

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК: 539.23, 539.216.1, 621.787: 621.789
ГРНТИ: 29.12.22, 55.03.05, 55.20.27, 55.22.29
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
От имени Руководителя организации _____/ В.А. Ковалев/ М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 4 этапа Государственного контракта
№ 16.740.11.0641 от 02 июня 2011 г.

Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.1 Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук.
Проект: Нанотехнологии поверхностного слоя при внешних энергетических воздействиях на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин
Руководитель проекта: _____/Махалов Максим Сергеевич (подпись)

Кемерово
2012 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
по Государственному контракту 16.740.11.0641 от 02 июня 2011 на выполнение
поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Руководитель темы:

кандидат технических наук, без ученого звания	_____	Махалов М. С.
	подпись, дата	

Исполнители темы:

доктор технических наук, профессор	_____	Блюменштейн В. Ю.
	подпись, дата	

кандидат технических наук, доцент	_____	Кречетов А. А.
	подпись, дата	

без ученой степени, без ученого звания	_____	Пимонов М. В.
	подпись, дата	

без ученой степени, без ученого звания	_____	Зенков А. А.
	подпись, дата	

Реферат

Отчет 66 с., 2 ч., 51 рис., 6 табл., 10 источн., 0 прил.

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРОГРАММА НАГРУЖЕНИЯ, УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, ИНТЕНСИВНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ, ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 4 этапу Государственного контракта № 16.740.11.0641 "Наноинженерия поверхностного слоя при внешних энергетических воздействиях на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин" (шифр "2011-1.3.1-207-008") от 02 июня 2011 по направлению "Проведение научных исследований молодыми кандидатами наук в следующих областях: - нанотехнологии и наноматериалы; - механотроника и создание микросистемной техники; - создание биосовместимых материалов; - создание и обработка композиционных и керамических материалов; - создание и обработка кристаллических материалов; - создание и обработка полимеров и эластомеров; - создание мембран и каталитических систем; - металлургические технологии; - строительные технологии" в рамках мероприятия 1.3.1 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук.", мероприятия 1.3 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук и целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Разработка теории и раскрытие наследственных физических закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин и разработка средств автоматизации проектирования комбинированных упрочняющих технологических процессов

Экспериментальные исследования топографии поверхности деформированных образцов проводились с использованием метода атомно-силовой микроскопии и разработанных методик упрочняющей обработки экспериментальных образцов поверхностным пластическим деформированием и интенсивной пластической деформацией по схеме кручения с реализацией сжатия.

При исследовании повышения механических и эксплуатационных свойств за

счет совмещения методов ИПД также использовались экспериментальные образцы, упрочненные интенсивной пластической деформацией по схеме кручения с реализацией сжатия. Исследования образцов проводились с использованием методов оптической микроскопии, измерения микротвердости и механических испытаний на растяжение.

Экспериментальные исследования топографии поверхности деформированных образцов проводились с использованием атомно-силового микроскопа NanoEducator (НТ-МДТ) и сканирующего туннельного микроскопа «УМКА».

Экспериментальные исследования исследований повышения механических и эксплуатационных свойств за счет совмещения методов ИПД поверхностного слоя проводились с использованием:

- оптического микроскопа Carl Zeiss AxioObserver A1m, для исследования зеренной структуры образцов;
- ультрамикротвердомера DUN-211S (Shimadzu, Япония), для исследования микротвердости образцов;
- системы универсальной электромеханической Instron 3369, для исследования механических свойств образцов на растяжение, сжатие и изгиб;
- установки для проведения совмещенной обработки ИПД по схеме кручения в условиях сжатия с реализацией противодействия оригинальной конструкции, разработанной коллективом исследователей КузГТУ.

Моделирование процесса осуществлялось методом конечных элементов с использованием программного комплекса «Ansys».

Регрессионный анализ данных, получение статистических моделей и их оценка осуществлялись с использованием программного комплекса «Statistica».

Материалы теоретических и экспериментальных исследований, раскрывающие содержание работ по решению поставленных научно-исследовательских задач, включая:

1. Результаты экспериментальных исследований топографии поверхности деформированных образцов.
2. Результаты экспериментальных исследований повышения механических и эксплуатационных свойств за счет совмещения методов ИПД поверхностного слоя.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Титульный лист	1
Список исполнителей	2
Реферат	3
Содержание	5
Введение	6
1. Экспериментальные исследования топографии поверхности деформированных образцов	8
2. Экспериментальные исследования повышения механических и эксплуатационных свойств за счет совмещения методов ИПД поверхностного слоя	14
2.1. Моделирование формирования напряженно-деформированного состояния при деформационном наноструктурировании	14
2.2. Экспериментальные исследования свойств металла изделий в мелкодисперсном состоянии после совмещенной обработки интенсивной пластической деформацией методом кручения в условиях сжатия	47
2.2.1. Результаты экспериментальных исследований размеров зёрен образцов	49
2.2.2. Результаты экспериментальных исследований микротвёрдости образцов	51
2.2.3. Результаты экспериментальных испытаний на разрыв образцов	60
Заключение	64
Список использованных источников	66

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день общепринятым является представление о трансформации структуры металла в наноразмерное состояние (с характерным размером структуры менее 100 нм) как об одном из эффективных способов существенного повышения эксплуатационных свойств изделий. Так, использование интенсивной пластической деформации (ИПД) позволяет повысить микротвердость титана в 1,9 раз, предел текучести более чем в 4 раза при сохранении удовлетворительной пластичности.

Дополнительное использование других технологических методов обработки позволяет создавать многофункциональные структурные наноразмерные поверхностные комплексы, обеспечивающие значительное повышение эксплуатационных свойств деталей машин, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

При характерном размере структуры менее 100 нм традиционные подходы материаловедения и технологии машиностроения не позволяют в полной мере объяснить наблюдаемые закономерности формирования наноразмерной структуры и прогнозировать результат обработки.

Также рассмотрение поверхностного слоя на наноразмерном уровне позволяет выявить некоторые неясные до настоящего времени особенности процессов, происходящих на стадиях комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации деталей машин. В многочисленных существующих работах в области нанотехнологий основное внимание уделяется физическим основам нанотехнологий; методам исследования, анализа и аттестации наноструктур и наноматериалов; наноэлектронике, наносистемам и др. Инженерные приложения деформационного наноструктурирования для повышения эксплуатационных свойств традиционных деталей машин практически отсутствуют, что сдерживает создание и широкое применение новых совмещенных и комбинированных

упрочняющих технологий наноструктурирования в реальном секторе экономики.

Проект направлен на раскрытие наследственных физических закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния и остаточных напряжений поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин. Эти закономерности требуются для разработки комбинированных упрочняющих технологических процессов и средств их автоматизации.

В рамках отчетного этапа выполнены экспериментальные исследования топографии и повышения механических и эксплуатационных свойств за счет совмещения методов ИПД поверхностного слоя деформированных образцов.

Показано, что для реализации деформационного наноструктурирования необходимым условием является осуществление деформации сдвига в условиях сжатия.

Разработан способ получения ультрамелкозернистых структур прокаткой. Особенностью способа является реализация в процессе обработки схемы деформирования сдвигом в условиях сжатия за счет специальным образом расположенных прокатных валков.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что увеличение механических свойств материала, обработанного с использованием разработанного способа, действительно связано с реализацией схемы деформирования сдвигом в условиях сжатия.

На следующем этапе выполнения НИР планируется аналитическое описание закономерностей формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя в процессах комбинированной упрочняющей обработки и эксплуатации и разработка аналитических моделей программ нагружения, имеющих значительное количество участков квазимонотонной деформации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗА СЧЕТ СОВМЕЩЕНИЯ ИПД ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ДРУГИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

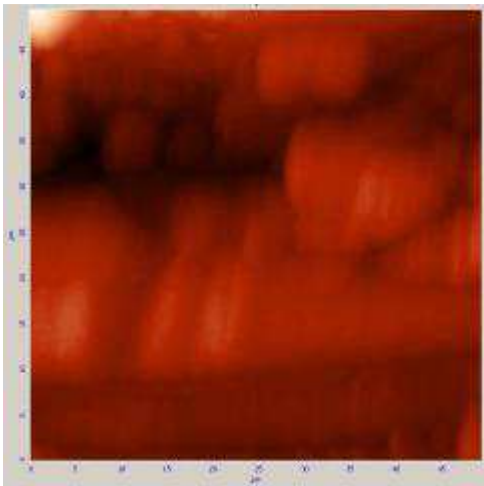
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ

С помощью прибора NanoEducator методом атомно-силовой микроскопии проводилось сканирование поверхности подготовленных экспериментальных образцов. Режимы сканирования экспериментальных образцов приведены в таблице 1.1. Полученные изображения поверхностей представлены на рис. 1.1-1.10. В настоящее время проводится анализ полученных результатов с целью выявления устойчивых взаимосвязей и тенденций.

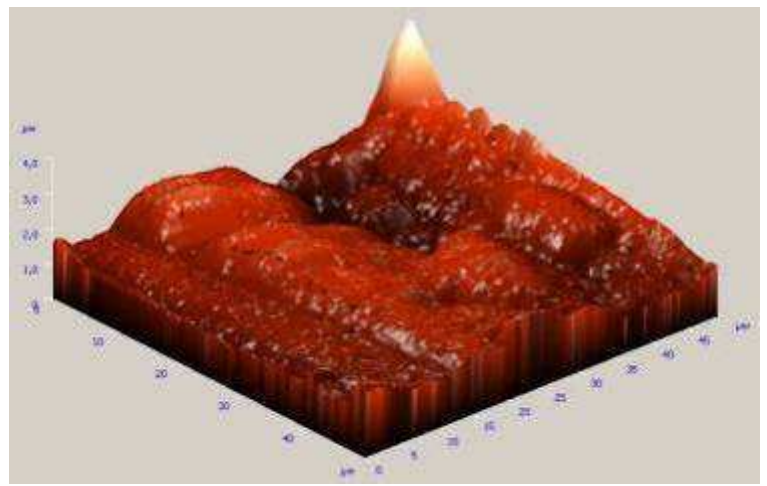
Таблица 1.1

Режимы сканирования образцов методом АСМ

Маркировка образца	№ скана	№ рис.	Режим сканирования				
			Размер поля сканирования, нм	Шаг сканирования, нм	Разрешение, точек	Скорость хода зонда, мкм/с	
						прямого	обратного
ии	1	1.1	49220x49220	385x385	128x128	10,72	20
ии	2	1.2	9384x9384	34x34	276x276	1,52	2,52
и	1	1.3	32810x32810	126x126	256x256	7,21	15,21
и	2	1.4	9912x9912	77x77	128x128	1,02	2,12
и	3	1.5	49220x49220	385x385	128x128	10,72	20
и	4	1.6	43520x43520	340x340	128x128	10,72	20
и	5	1.7	10094x10094	48x48	210x210	3,03	4,36
и	6	1.8	10094x10094	48x48	210x210	3,03	4,36
лол	1	1.9	49128x49128	178x178	276x276	10	20
лол	2	1.10	10254x10254	80x80	128x128	1,69	2,52

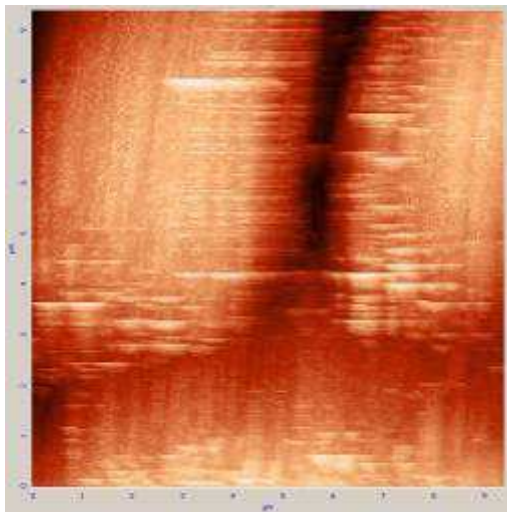


плоское (2D)

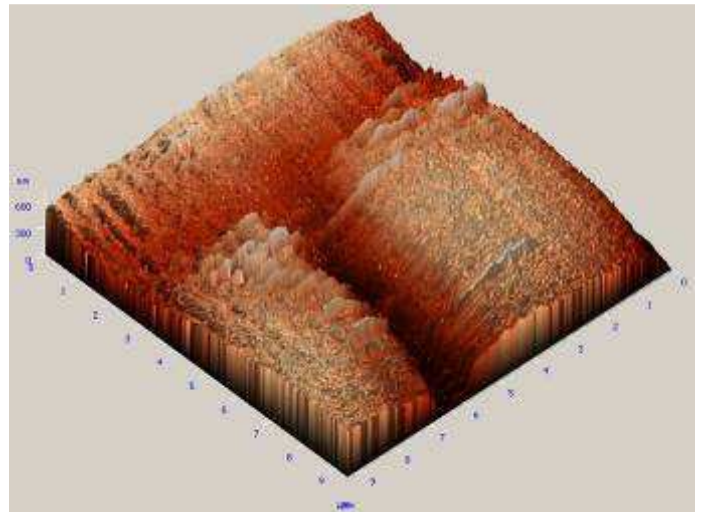


объемное (3D)

Рис. 1.1. АСМ-изображение поверхности образца «ии» (скан 1)

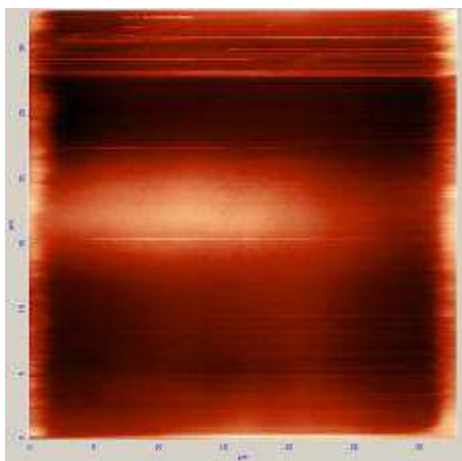


плоское (2D)

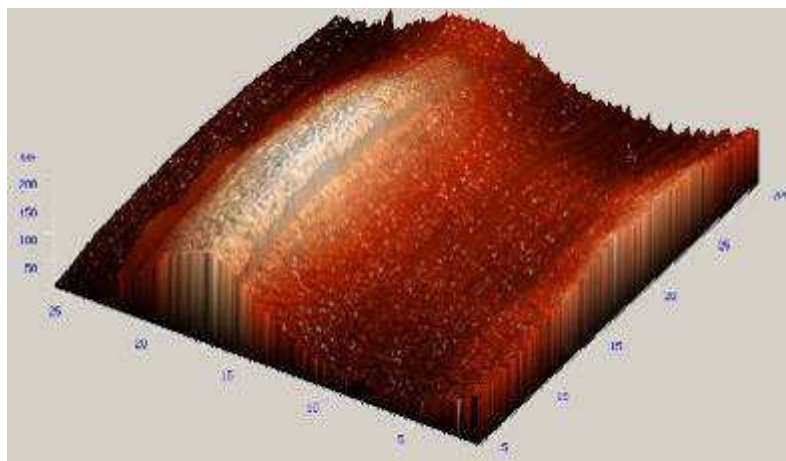


объемное (3D)

Рис. 1.2. АСМ-изображение поверхности образца «ии» (скан 2)

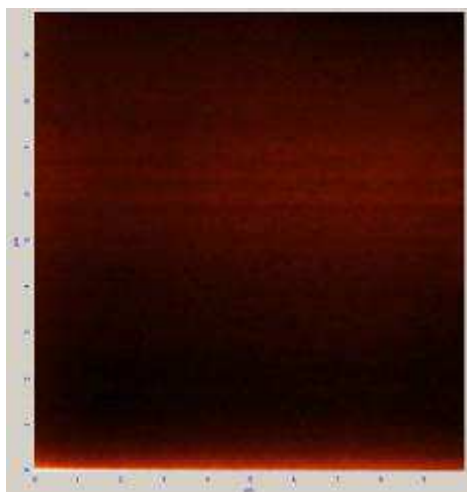


плоское (2D)

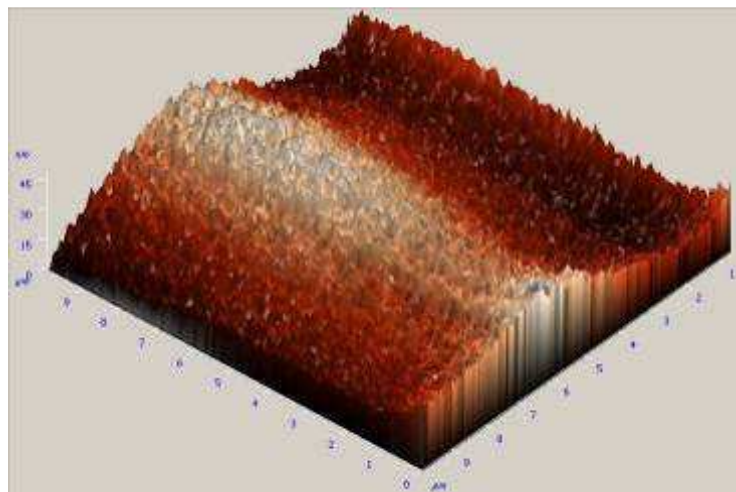


объемное (3D)

Рис. 1.3. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 1)

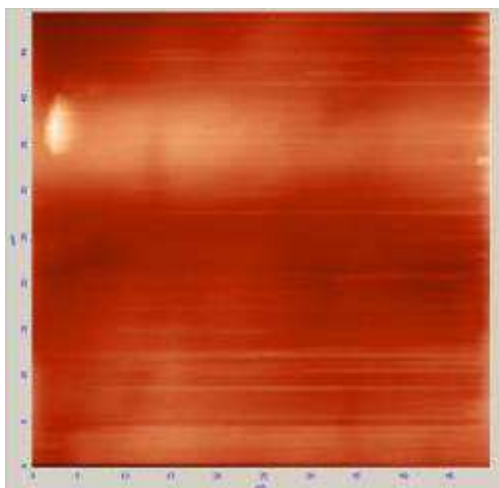


плоское (2D)

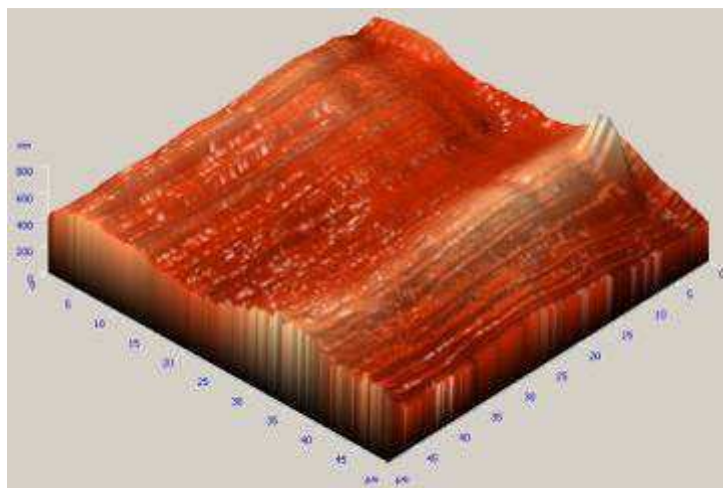


объемное (3D)

Рис. 1.4. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 2)

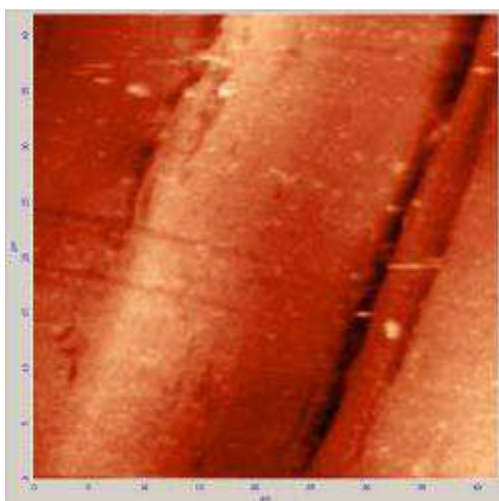


плоское (2D)

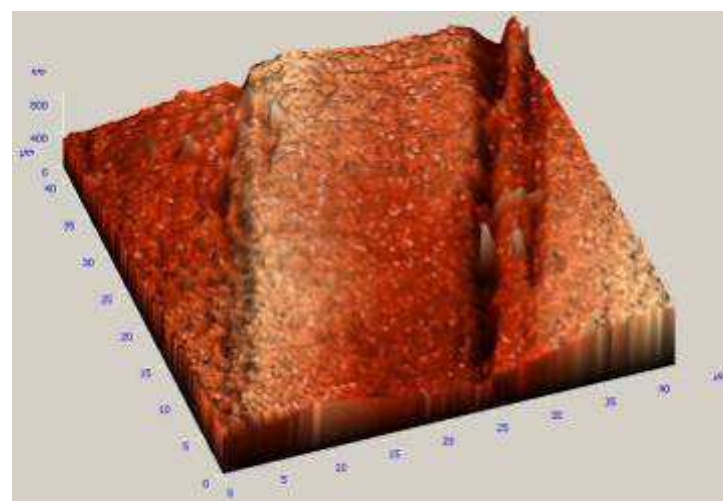


объемное (3D)

Рис. 1.5. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 3)

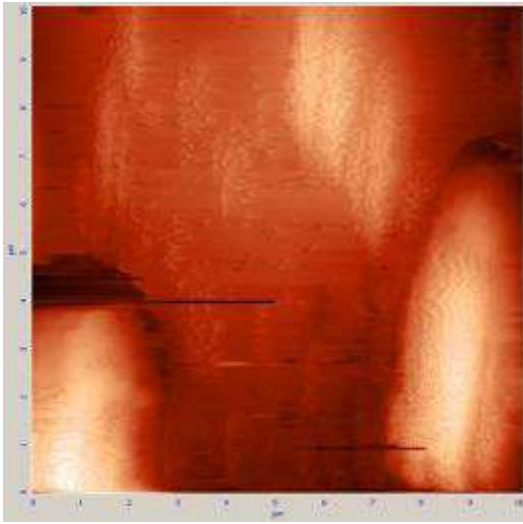


плоское (2D)

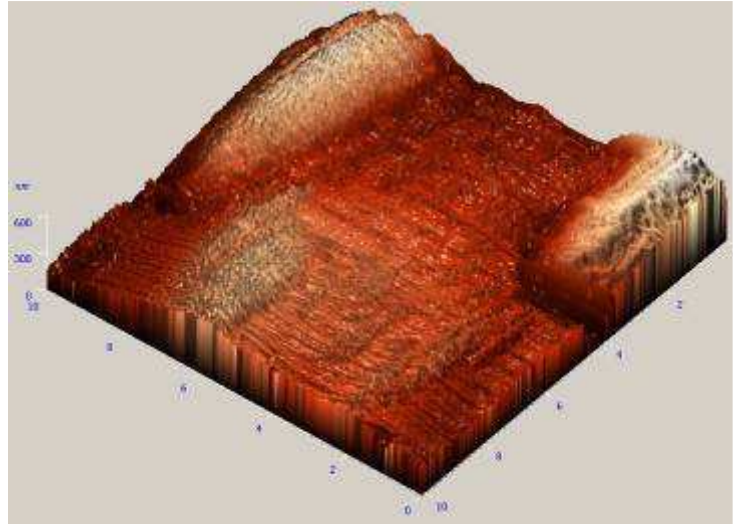


объемное (3D)

Рис. 1.6. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 4)

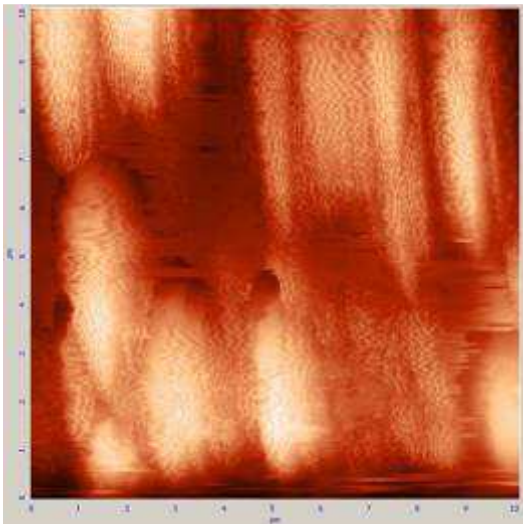


плоское (2D)

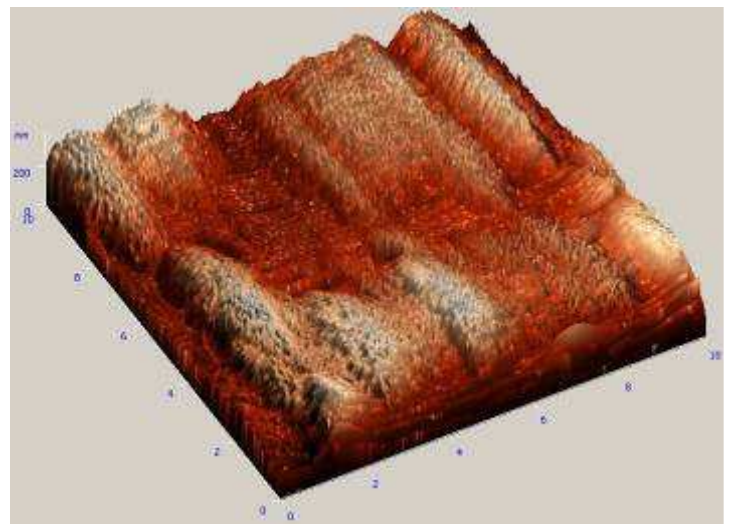


объемное (3D)

Рис. 1.7. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 5)

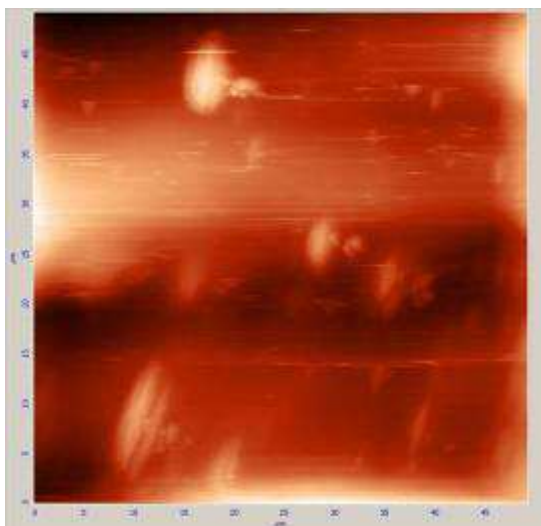


плоское (2D)

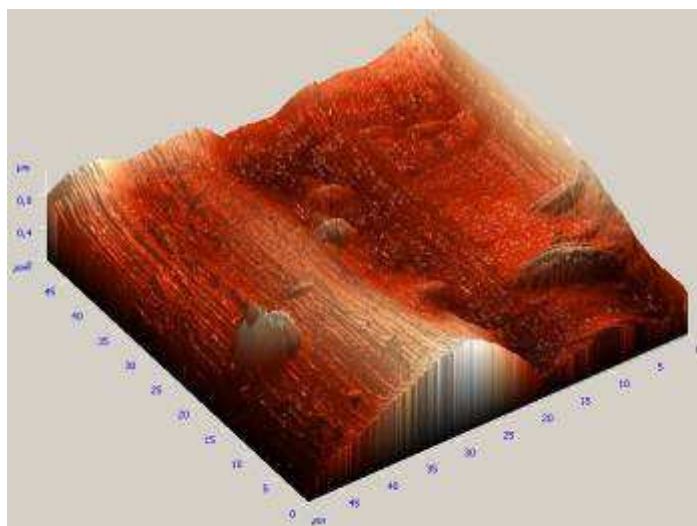


объемное (3D)

Рис. 1.8. АСМ-изображение поверхности образца «и» (скан 6)

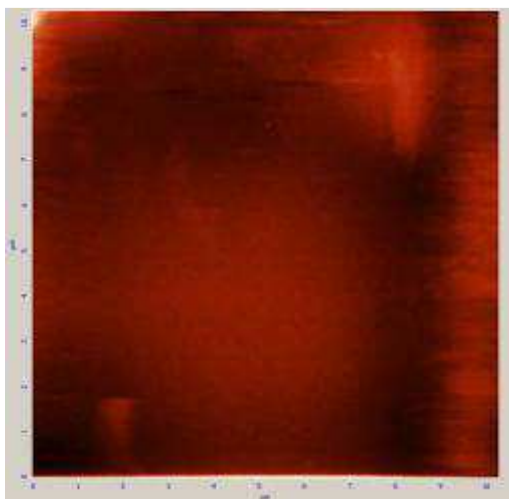


плоское (2D)

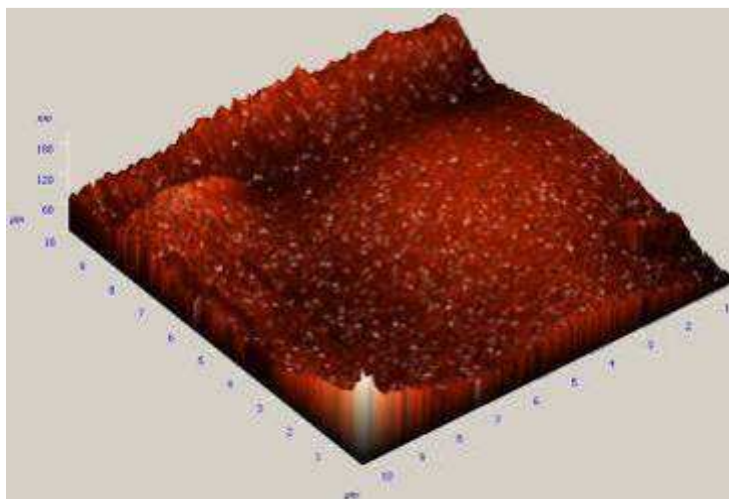


объемное (3D)

Рис. 1.9. АСМ-изображение поверхности образца «лол» (скан 1)



плоское (2D)



объемное (3D)

Рис. 1.10. АСМ-изображение поверхности образца «лол» (скан 1)

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЗА СЧЕТ СОВМЕЩЕНИЯ МЕТОДОВ ИПД ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

2.1. Моделирование формирования напряженно-деформированного состояния при деформационном наноструктурировании

Моделирование проводилось в плоско-деформированной постановке. Базовым процессом для исследований был выбран метод РКУП, как наиболее эффективный при получении НС-материалов. Угол пересечения каналов в матрице был принят равным 90° , для исключения краевых эффектов область пересечения каналов моделировалась в виде радиуса [1]. Радиус внутреннего угла для всех моделей был равен 2,5 мм, а радиус внешнего угла принимал значения 2,5, 5 и 10 мм. К верхней границе заготовки прикладывалось смещение, которое принимало значения 1, 3, 5 и 7 мм.

Установлено, что в оснастке с радиусами сопряжения каналов, близкими к нулю и при полном заполнении профиля каналов, наблюдается неоднородное поле средних нормальных напряжений в очаге деформации [2-4]. Так, интенсивность напряжения в области внешнего угла имеет тенденцию резко меняться от сжимающих к растягивающим, что может становиться предпосылкой появления поверхностных и сквозных трещин на образцах при РКУП. Для обеспечения однородного деформированного состояния необходимо согласованное использование фиксированных величин радиусов сопряжения каналов и противодействия или разработка специальной геометрии оснастки. Такой подход приводит к созданию процессов получения заготовок с однородными по объему УМЗ структурами как в пластичных, так и в труднодеформируемых металлах и сплавах [5-6].

Для выявления более благоприятного значения внешнего радиуса для формирования однородной ультрамелкозернистой структуры, а также для оценки влияния значения внешнего радиуса на степени накопленной

деформации и величины напряжений, возникающих в заготовке в процессе обработки, и выявления закономерностей влияния параметров технологии изготовления на эволюцию структурного состояния, моделировались 3 различных значения.

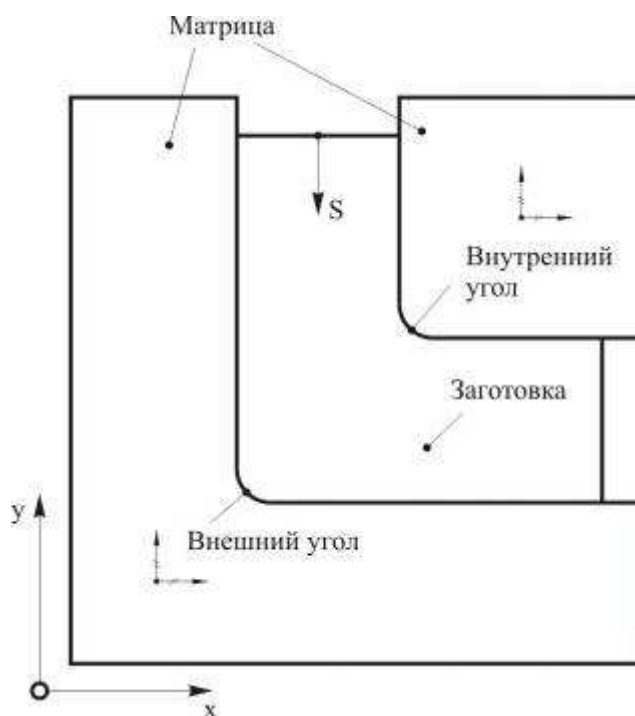


Рис. 2.1. Общий вид конечно-элементной модели

Матрица моделировалась как абсолютно жесткое тело и жестко закреплялась. Обрабатываемая заготовка моделировалась как упругопластическое тело, механические свойства материала соответствовали стали 45. Модуль Юнга принимался равным 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность 7800 кг/м³. Коэффициент трения заготовки и стенок матрицы принимался по данным литературных источников 0,041 [3,7-8].

Для моделирования был выбран конечный элемент типа Visco Solid 4node plas 106. Элемент VISCO 106 используется для 2D-моделирования твердотельных структур. Он может быть использован как в условиях плоской деформации, так и для осесимметричных элементов и определяется четырьмя узлами, имеющими до 3-х степеней свободы в каждом: перемещения в узловых x, y и z направлениях. Элемент призван решать как изохорные

(постоянный объем), не зависящие от скорости, так и зависящие от скорости проблемы большой пластической деформации. Для решения с VISCO 106 должны применяться итерационные процедуры, поскольку он используется для представления сильно нелинейного поведения. Большие прогибы (NLGEOM) должны быть активными, чтобы обновлять геометрию в каждом подшаге.

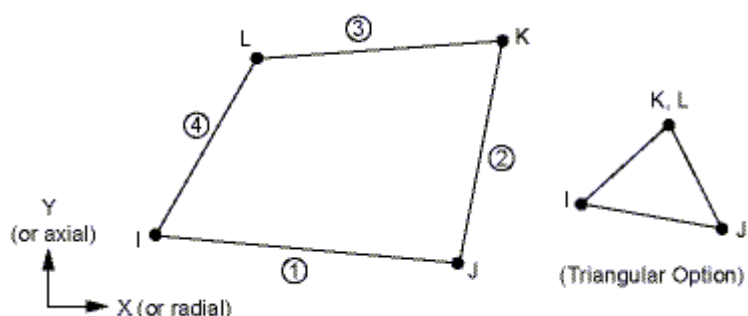


Рис. 2.2. VISCO106 – геометрия

Геометрия, положение узлов и система координат для этого узла показаны на рис. 2.2. Входные данные для элемента включают 4 узла и линейные и нелинейные свойства материала. Нагрузка может быть приложена как давление на поверхность (показано на рис. 2.2.). Положительные давления действуют внутри элемента.

Решение связано с элементом в двух формах:

- 1) Узловые перемещения, включенные в общее узловое решение.
- 2) Дополнительные элементные решения.

Допущения и ограничения:

- 1) Площадь элемента должна быть положительной.
- 2) Элемент должен находиться в глобальной плоскости XY, как показано на рис. 2.2., и ось Y должна быть осью симметрии для осесимметричного анализа. Осесимметричная структура должна быть построена в X+ квадрантах.

3) Треугольные элементы могут быть сформированы путем определения совмещения узлов К и L.

Конечно-элементная модель строилась в следующем порядке:

- 1) Сначала необходимо задать свойства материала и тип конечного элемента
- 2) Далее строятся ключевые точки модели, по которым будет вестись дальнейшее построение. Точки 1-2, 3-4, 5-6 и 7-8 это точки дуг радиусов скругления. В дальнейшем точки 5-6 и 7-8 будут перемещены к точкам 3-4 и 1-2 соответственно, так как радиусы скругления заготовки и матрицы совпадают.



Рис. 2.3. Этапы построения конечно-элементной модели (точки)

3) Далее через ключевые точки строятся линии модели.

В местах радиусов скругления получается по 2 линии. Внутренний угол – линии номер 3 и 4, внешний угол – линии номер 1 и 3.

4) Далее по этим линиям строятся площади, которые уже являются элементами модели.

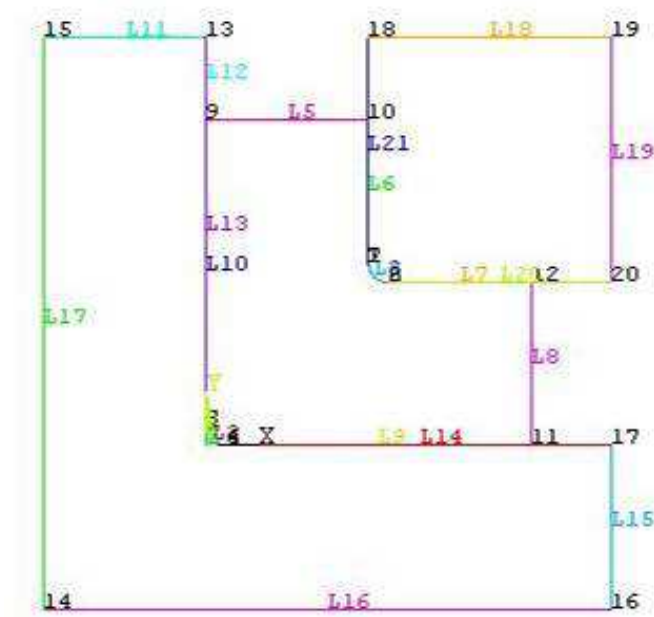


Рис. 2.4. Этапы построения конечно-элементной модели (линии)

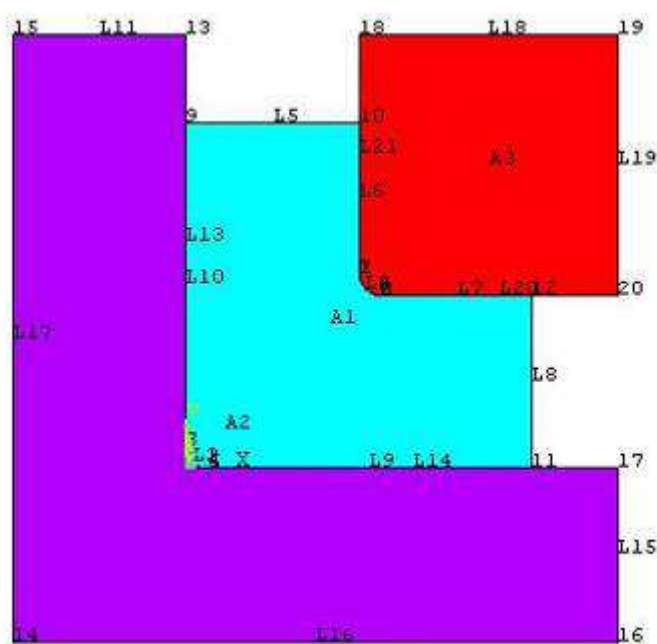


Рис. 2.5. Этапы построения конечно-элементной модели (площади)

A1 – площадь заготовки, продавливаемой через матрицу.

A2 – площадь внешней части матрицы.

A3 – площадь внутренней части матрицы.

5) На следующем этапе модель разбивается на конечные элементы с помощью функции Mesh-Areas-Free (см. рис. 2.2).

Далее разбиение уточняется с помощью функции Modify Mesh-Refine At-Areas. Уточнение производится для площади A1 (см. рис. 2.3).

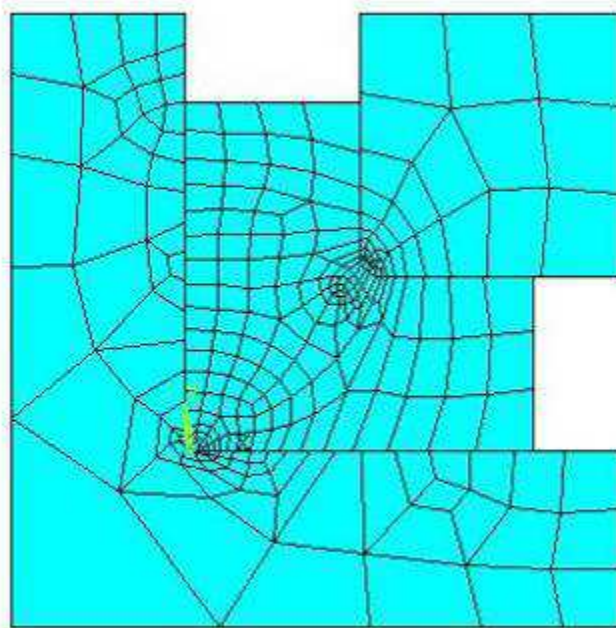


Рис. 2.6. Этапы построения конечно-элементной модели (разбиение)

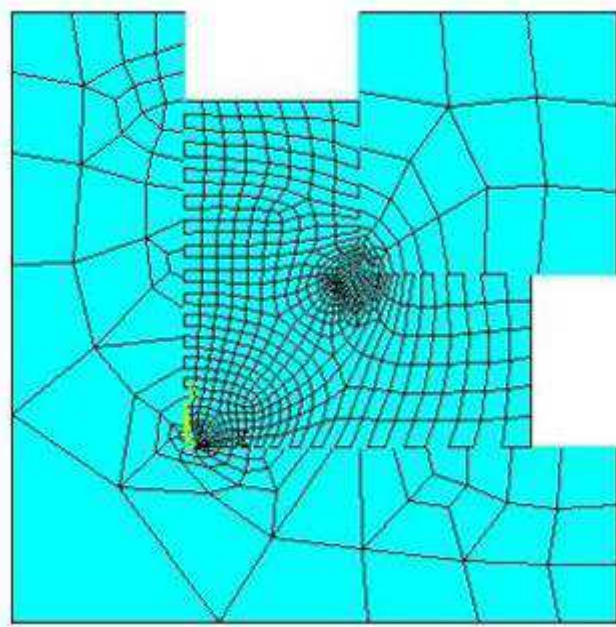


Рис. 2.7. Этапы построения конечно-элементной модели (разбиение
уточненное)

6) На данном этапе создаются контактные пары между заготовкой и внутренней и внешней частью матрицы.

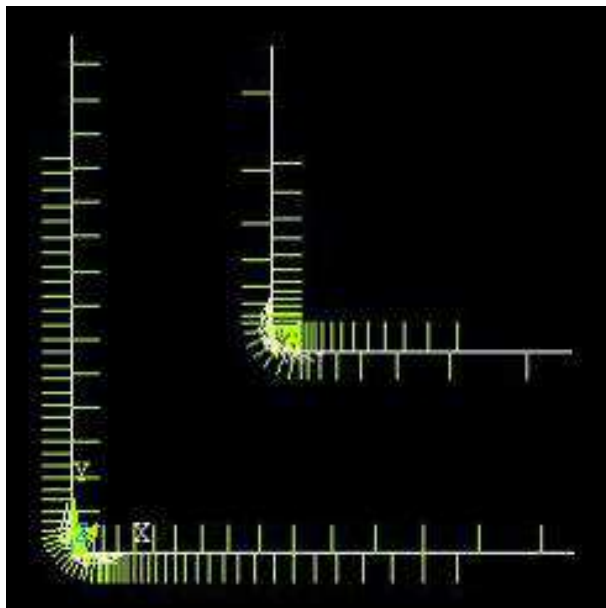


Рис. 2.8. Этапы построения конечно-элементной модели (контактные пары)

7) Далее прикладываются нагрузки. Матрица жестко закрепляется по осям X и Y , а к заготовке прикладываются перемещения, принимающие значения 1, 3, 5 и 7 мм.

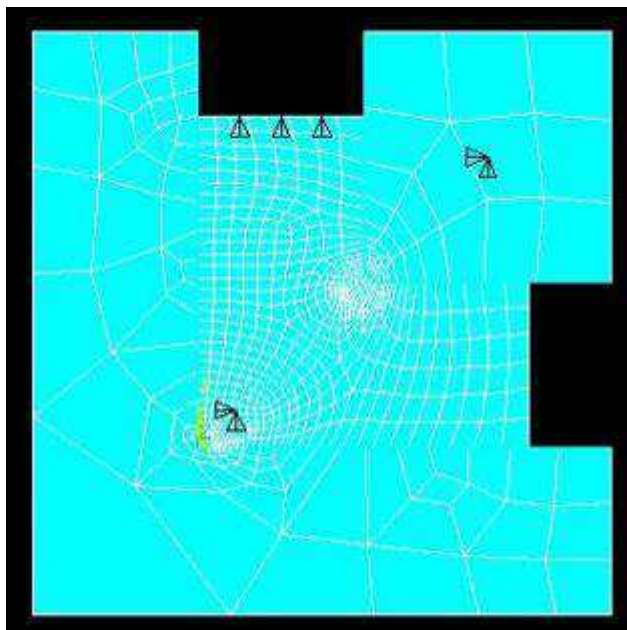


Рис. 2.9. Этапы построение конечно-элементной модели (нагрузки)

8) На последнем этапе производится решение модели, результаты решения можно просмотреть в виде эпюр

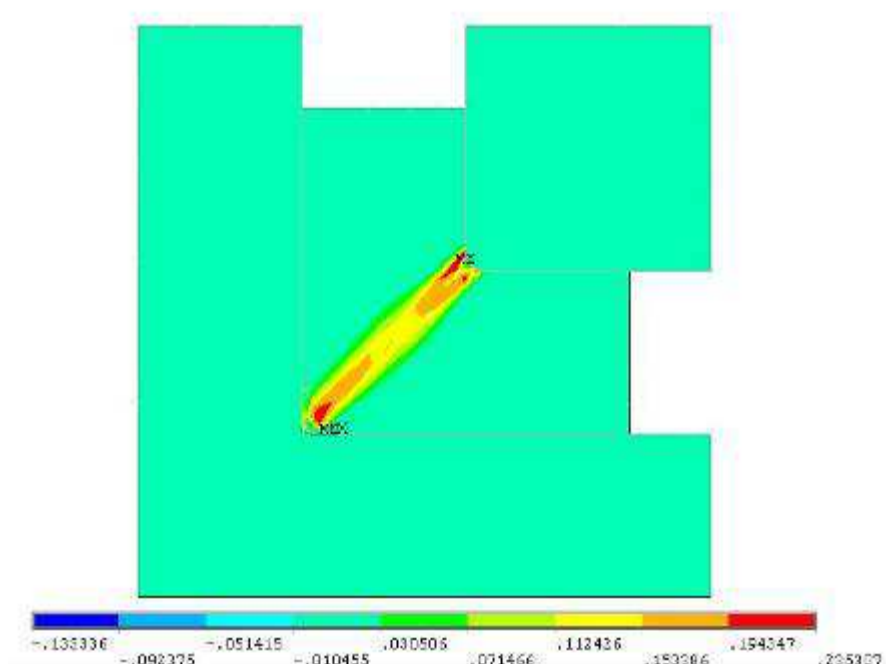


Рис. 2.10. Этапы построения конечно-элементной модели (решение – эпюра для деформаций по оси X при смещении 1 мм)

Максимальные растягивающие напряжения возникают возле внутреннего угла матрицы и уменьшаются с увеличением смещения 224 МПа, 214 МПа, 184 МПа и 182 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. Максимальные сжимающие напряжения, напротив, растут с увеличением смещения и составляют -139 МПа, -407 МПа, -476 МПа и -663 МПа соответственно. Растягивающие напряжения присутствуют около внутреннего угла, наибольшие сжимающие напряжения возникают в верхней части заготовки, а также около внешнего угла, увеличиваясь по значению и площади с ростом смещения. Также возникает зона примерно равных напряжений вдоль средней линии с увеличением смещения. При смещении 3 мм она уже заметна, далее значения сжимающих напряжений в этой зоне увеличиваются.

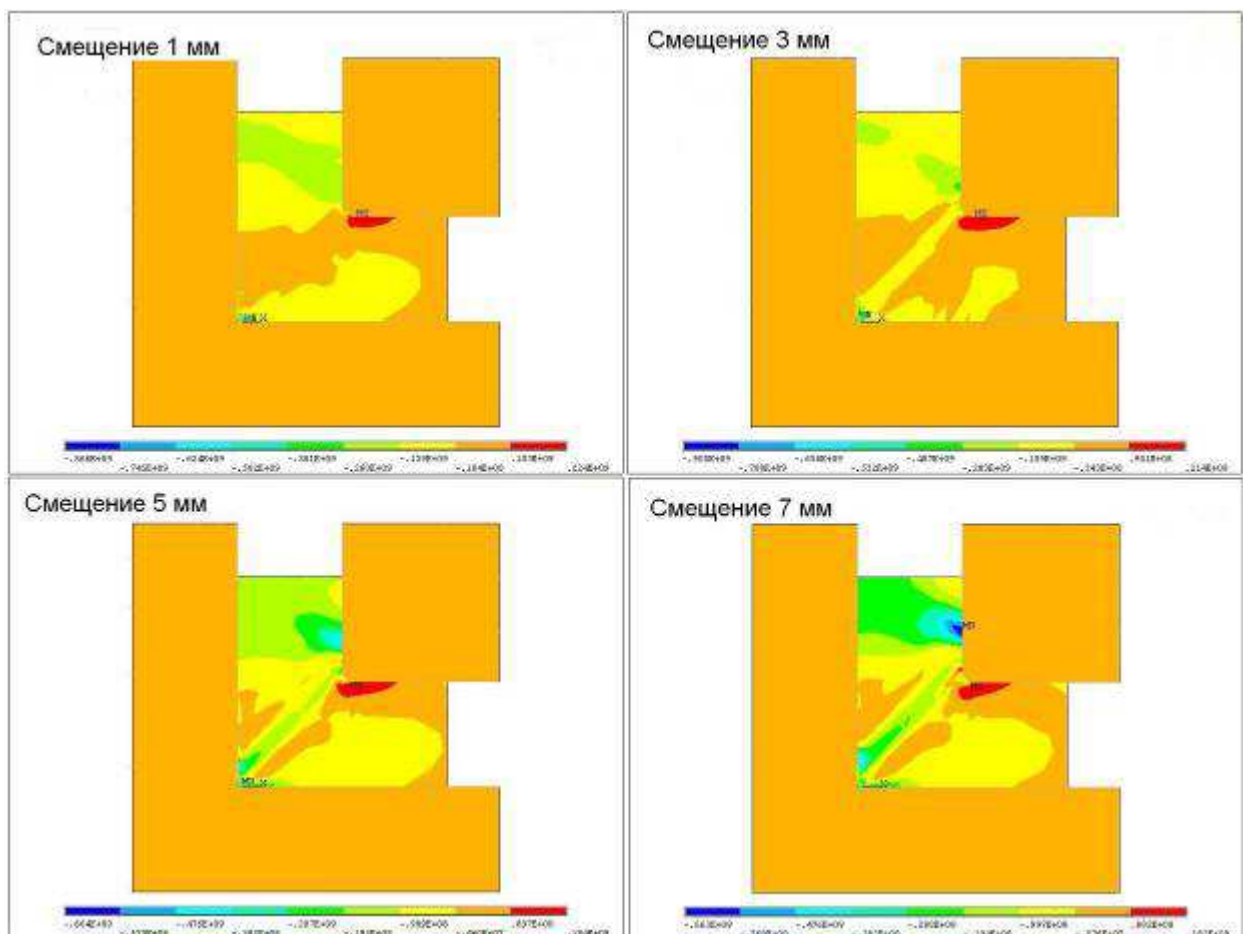


Рис. 2.11. Напряженное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

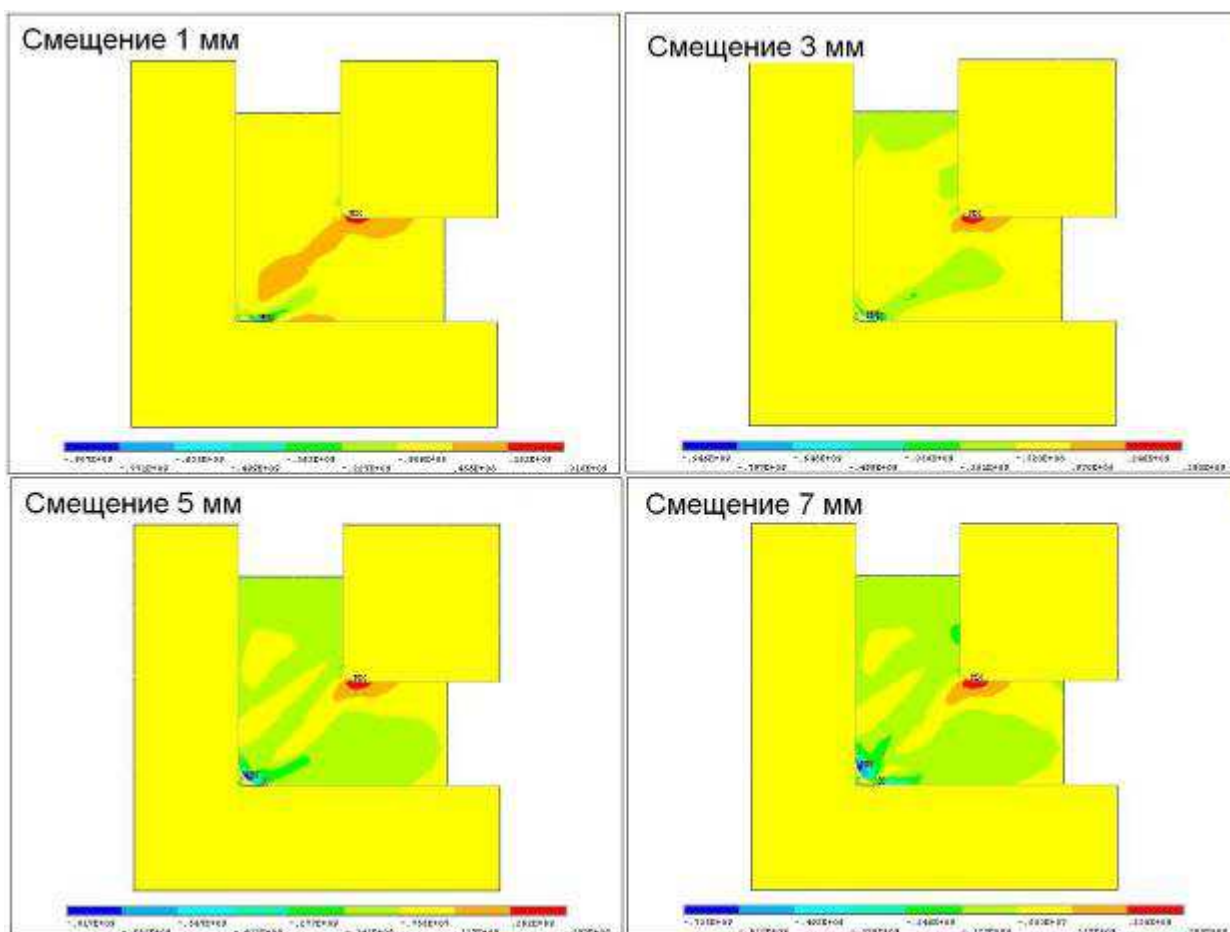


Рис. 2.12. Напряженное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Максимальные растягивающие напряжения возникают возле внутреннего угла матрицы и увеличиваются с увеличением смещения 318 МПа, 395 МПа и 397 МПа для смещений 1, 3 и 5 мм соответственно. При смещении 7 мм значение напряжений падает до 360 МПа. Максимальные сжимающие напряжения растут с увеличением смещения и составляют -499 МПа, -648 МПа и -817 МПа для смещений 1, 3 и 5 мм. Для смещения 7 мм значение сжимающих напряжений также падает до -735 МПа. Растягивающие напряжения присутствуют около внутреннего угла. Сжимающие напряжения возникают практически по всему объёму заготовки, максимальные значения достигаются около внешнего угла матрицы. Также заметна зона примерно равных напряжений вдоль средней линии, которая становится заметна при смещении 5 мм.

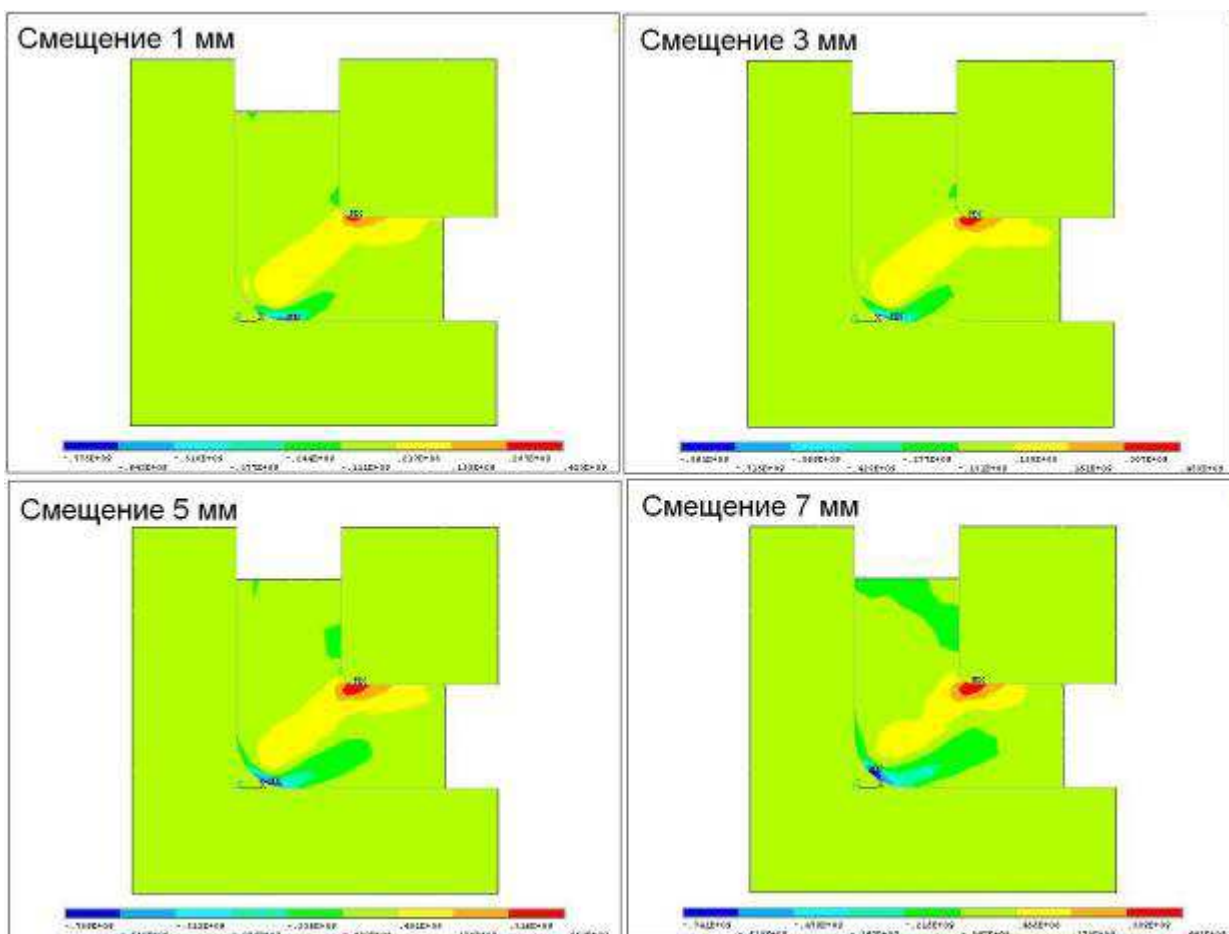


Рис. 2.13. Напряженное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Максимальные растягивающие напряжения возникают возле внутреннего угла матрицы и увеличиваются с увеличением смещения 420 МПа, 453 МПа и 454 МПа для смещений 1, 3 и 5 мм соответственно. При смещении 7 мм значение напряжений падает до 441 МПа. Максимальные сжимающие напряжения растут с увеличением смещения и составляют -775 МПа, -861 МПа и -817 МПа для смещений 1 и 3 мм. Для смещения 5 и 7 мм значения сжимающих напряжений падают до -789 МПа и 741 МПа соответственно. Растягивающие напряжения присутствуют около внутреннего угла, а также в зоне средней линии. Сжимающие напряжения занимают весь оставшийся объем заготовки, достигая максимальных значений в районе внешнего угла матрицы.

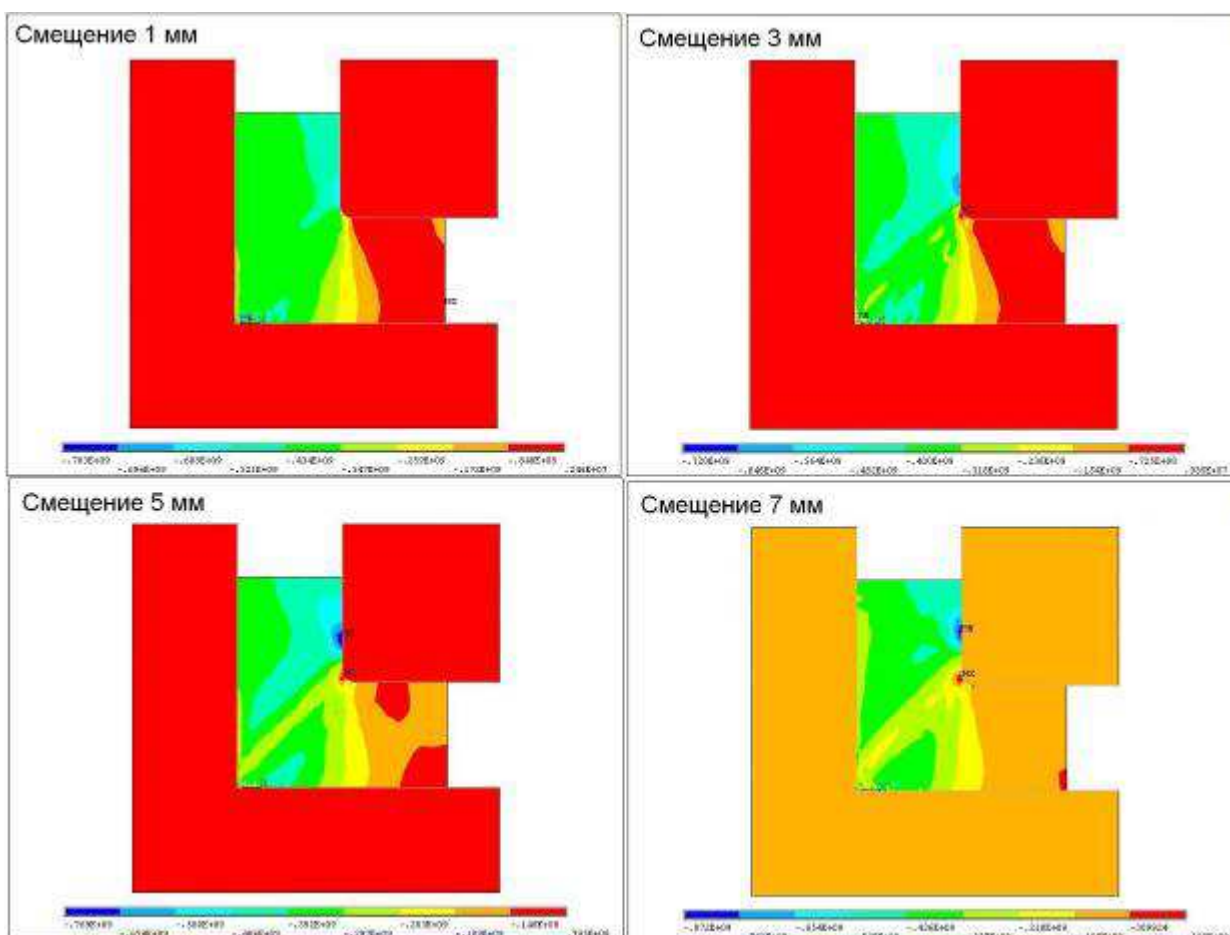


Рис. 2.14. Напряженное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Максимальные сжимающие напряжения возникают выше внутреннего угла матрицы и увеличиваются с увеличением смещения -608 МПа, -646 МПа, -769 МПа и -872 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. Растягивающие напряжения присутствуют в левой части заготовки, прошедшей через пересечение каналов. Их зона уменьшается с увеличением смещения, а значения растут и составляют 2,46 МПа, 9,35 МПа, 79,5 МПа и 109 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно.

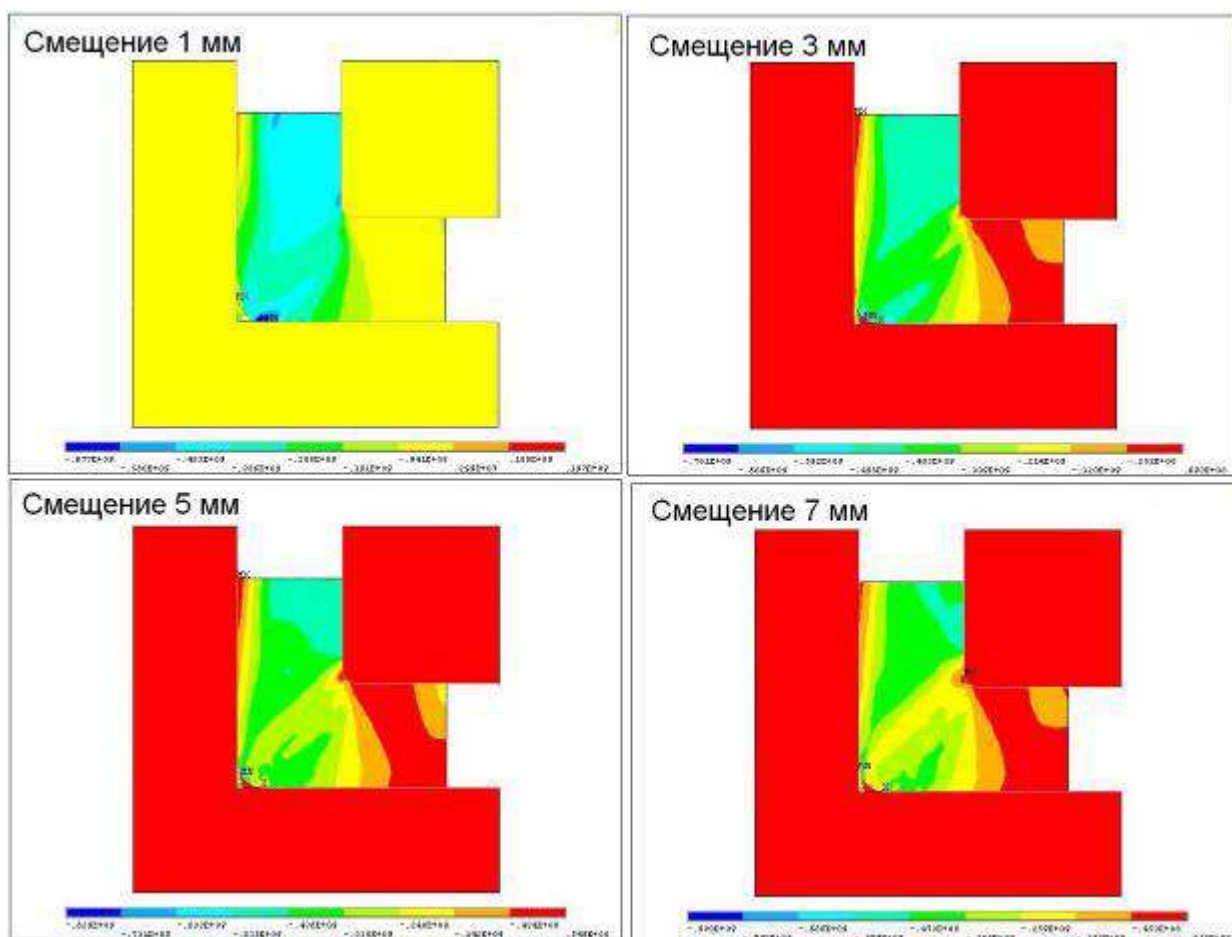


Рис. 2.15. Напряженное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Максимальные сжимающие напряжения возникают около внешнего угла матрицы и уменьшаются с увеличением смещения -677 МПа, -498 МПа, -436 МПа для смещений 1, 3 и 5 мм соответственно. Для смещения 7 мм их значения 473 МПа. Для смещений 5 и 7 мм максимальные сжимающие напряжения находятся в верхней правой части заготовки. Максимальные растягивающие напряжения находятся в верхней левой части заготовки и составляют 2,99 МПа, 69,3 МПа, 54,9 МПа и 61,5 МПа. Начиная со смещения 3 мм, растягивающие напряжения также появляются в части заготовки, прошедшей пересечение каналов матрицы.

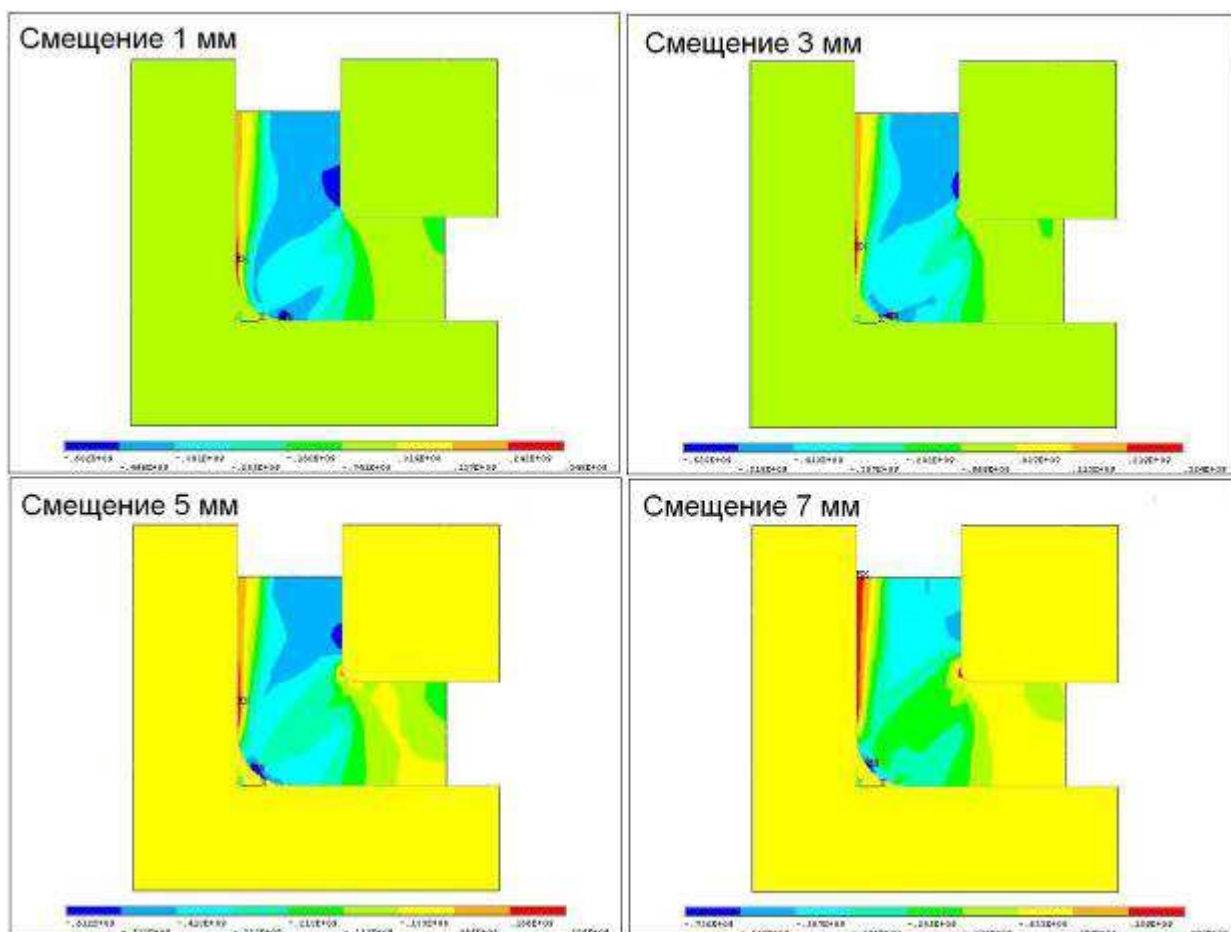


Рис. 2.16. Напряженное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Максимальные сжимающие напряжения для смещений 1, 3 и 5 мм находятся в районе внешнего радиуса, а также выше внутреннего радиуса, их значения -602 МПа, -622 МПа и -612 МПа соответственно. Для смещения 7 мм максимальные сжимающие напряжения -730 МПа находятся в районе внешнего радиуса матрицы. Максимальные растягивающие напряжения находятся выше внешнего радиуса матрицы и уменьшаются с увеличением смещения. Их значения составляют 348 МПа, 324 МПа, 286 МПа и 270 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно.

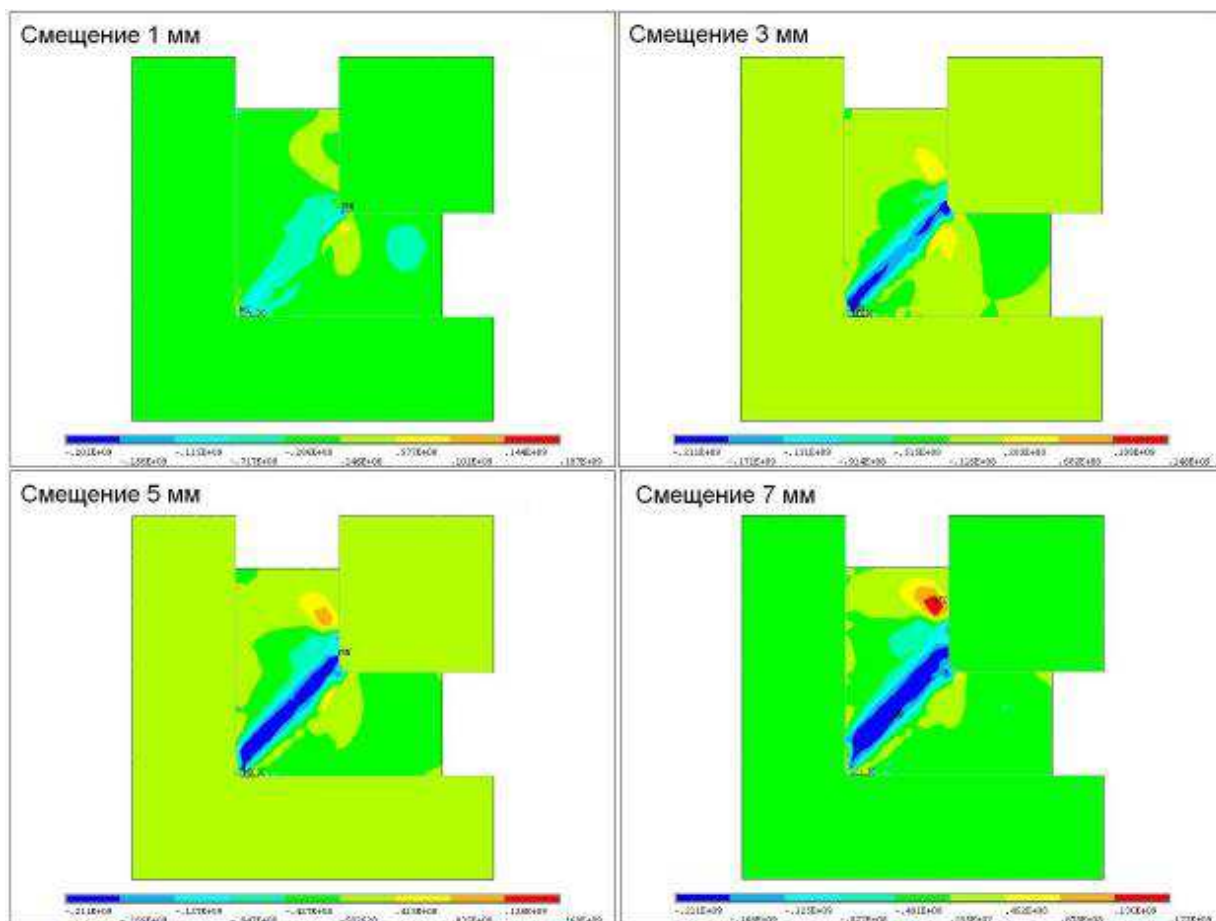


Рис. 2.17. Напряженное состояние в плоскости XY в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Максимальные сжимающие напряжения для смещения 1 мм находятся в районе внутреннего радиуса и составляют -201 МПа. Для смещения 3 мм максимальные касательные напряжения, направленные против часовой стрелки, находятся около внешнего и внутреннего радиусов матрицы и составляют -211 МПа. Для смещений 5 и 7 мм вся зона между внешним и внутренним радиусом заполнена отрицательными напряжениями -211 МПа. Максимальные касательные напряжения, направленные по часовой стрелке, для смещения 1 мм возникают ниже внутреннего радиуса и равны 57,7 МПа. Для смещений 3, 5 и 7 мм они равны 28,3 МПа, 83,5 МПа и 173 МПа соответственно и находятся выше внутреннего радиуса.

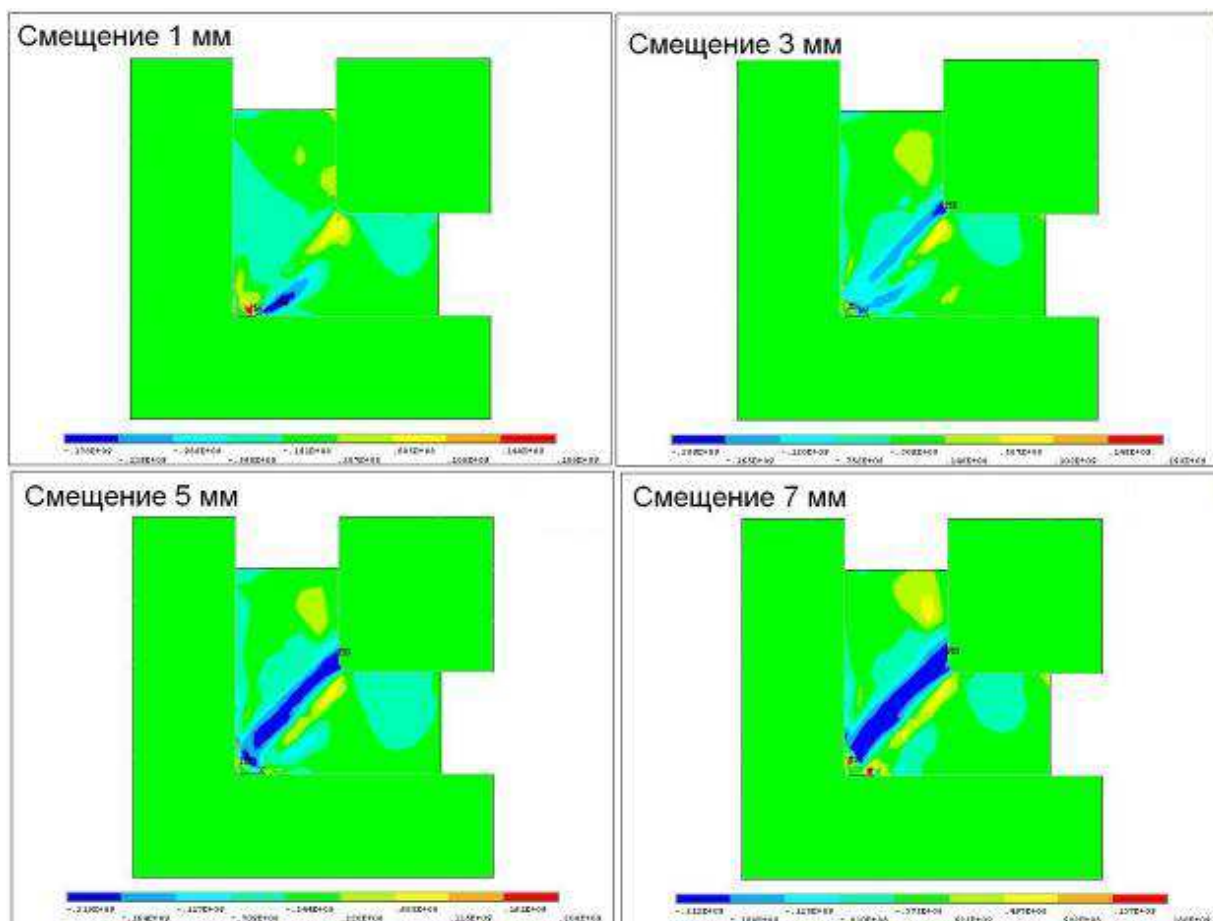


Рис. 2.18. Напряженное состояние в плоскости XY в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Для смещения 1 мм максимальные касательные напряжения, направленные против часовой стрелки, возникают правее внешнего радиуса матрицы и равны -178 МПа, а максимальные напряжения, направленные по часовой стрелке, возникают возле внешнего радиуса и равны 180 МПа. Для смещений 3, 5 и 7 мм максимальные отрицательные напряжения возникают в районе внешнего и внутреннего радиусов, причем, для смещений 5 и 7 мм они занимают всю зону между радиусами. Их значения равно -209, -210 и -212 МПа соответственно. Положительные же напряжения для смещения 3 и 5 мм возникают ниже внутреннего радиуса, а также занимают небольшую зону около внешнего радиуса. Их значения 58,7 и 58,5 МПа соответственно. Для смещения 7 мм максимальные положительные напряжения снова возникают в районе внешнего радиуса матрицы и равны 180 МПа.

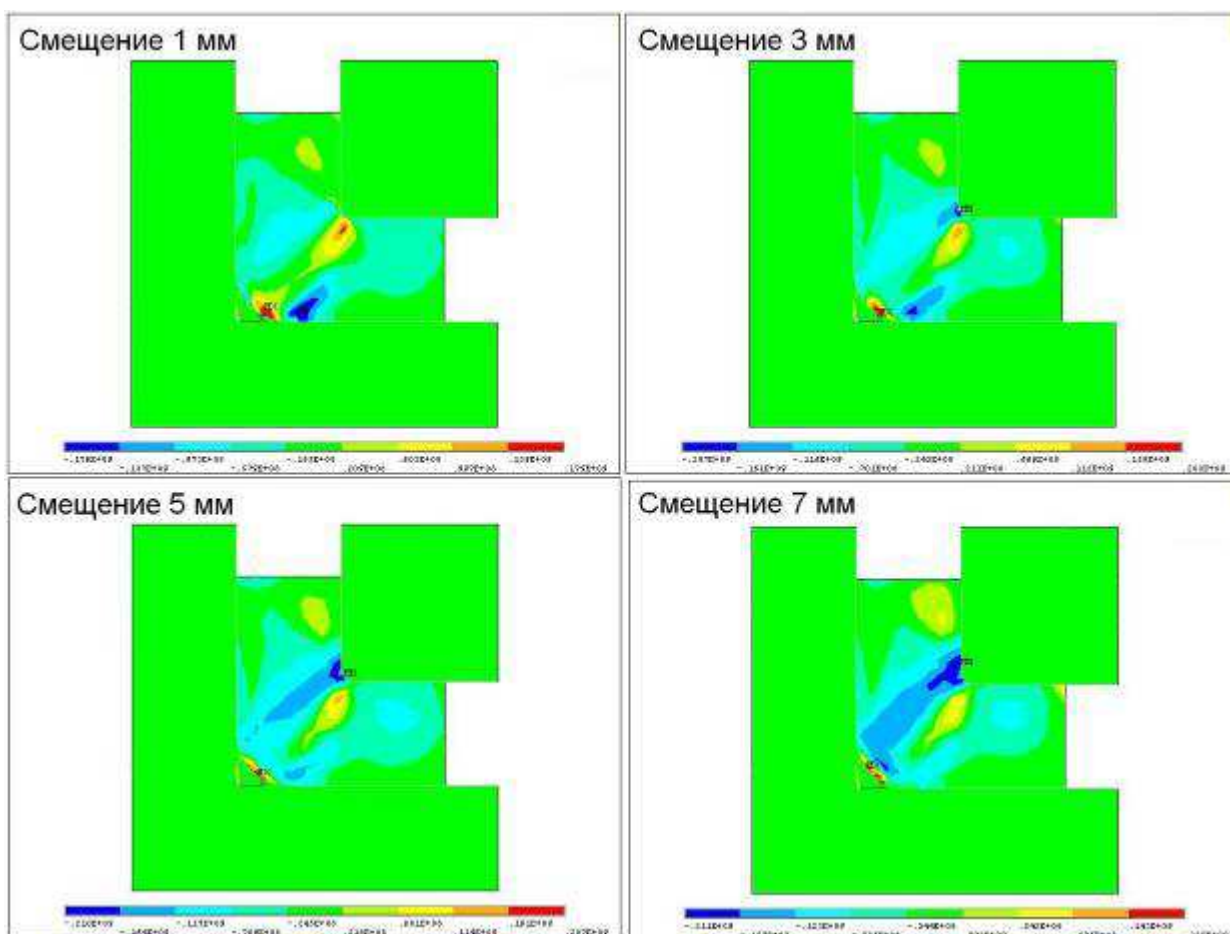


Рис. 2.19 Напряженное состояние в плоскости XY в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Максимальные касательные напряжения, направленные по часовой стрелке, возникают возле внешнего и внутреннего радиусов для смещения 1 мм, и возле внешнего радиуса для смещения 3, 5 и 7 мм. Их значения составляют 179, 203, 207 и 187 МПа соответственно. Максимальные касательные напряжения, направленные против часовой стрелки, возникают правее внешнего радиуса (для смещения 1 мм), правее внешнего радиуса и около внутреннего, (для смещения 3 мм), около внутреннего (для смещения 5 мм) и около внутреннего и внешнего радиусов матрицы для смещения 7 мм. Их значения -176, -207, -210 и -211 МПа соответственно. При данной геометрии наблюдается меньшая однородность распределения напряжений.

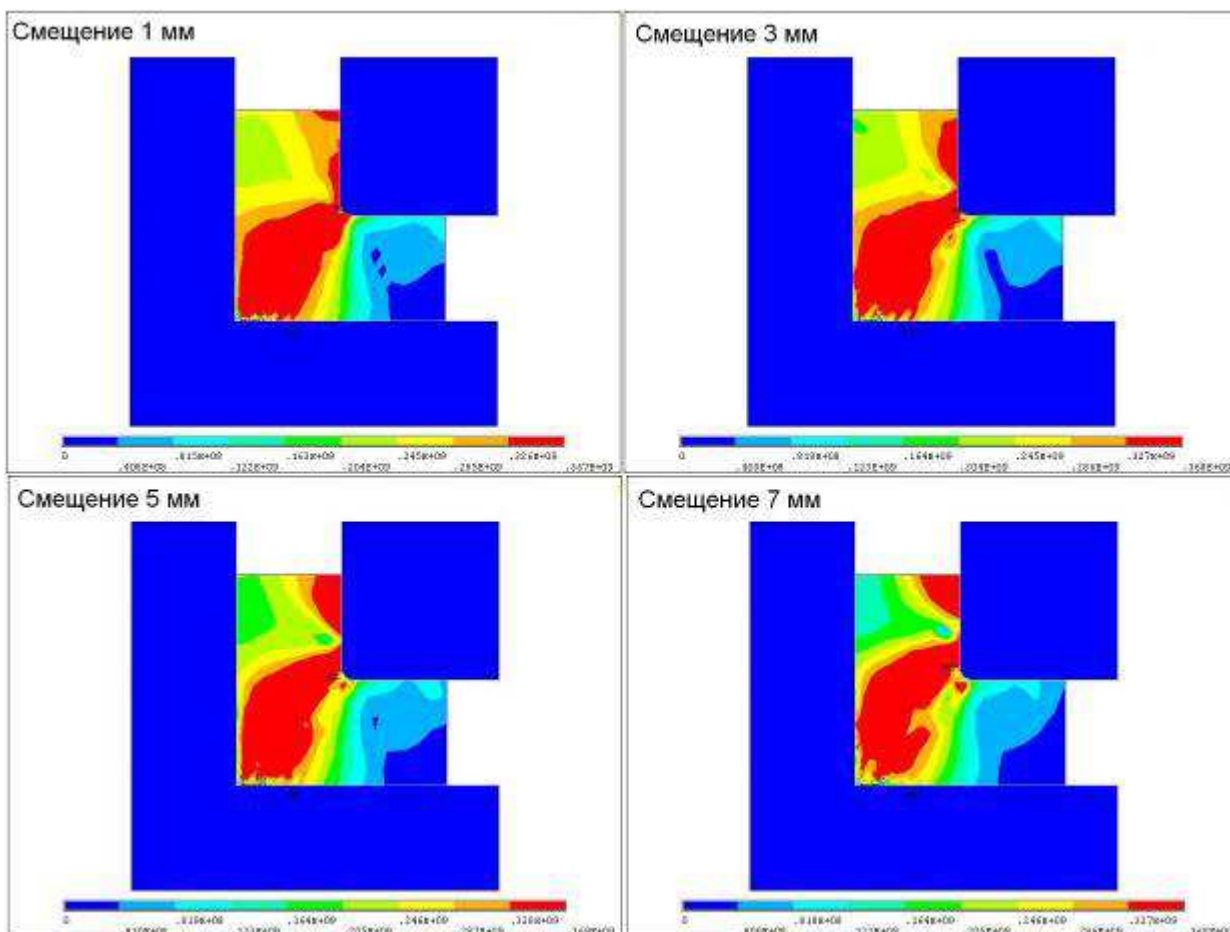


Рис. 2.20. Интенсивность напряжений в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Во всем объеме заготовки возникают только положительные напряжения. Наибольшие значения напряжений возникают в зоне между радиусами, причем, от внешнего радиуса к внутреннему эта зона сужается. Также максимальные значения присутствуют в верхней правой части заготовки. Их значения составляют 367, 368, 369 и 368 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно.

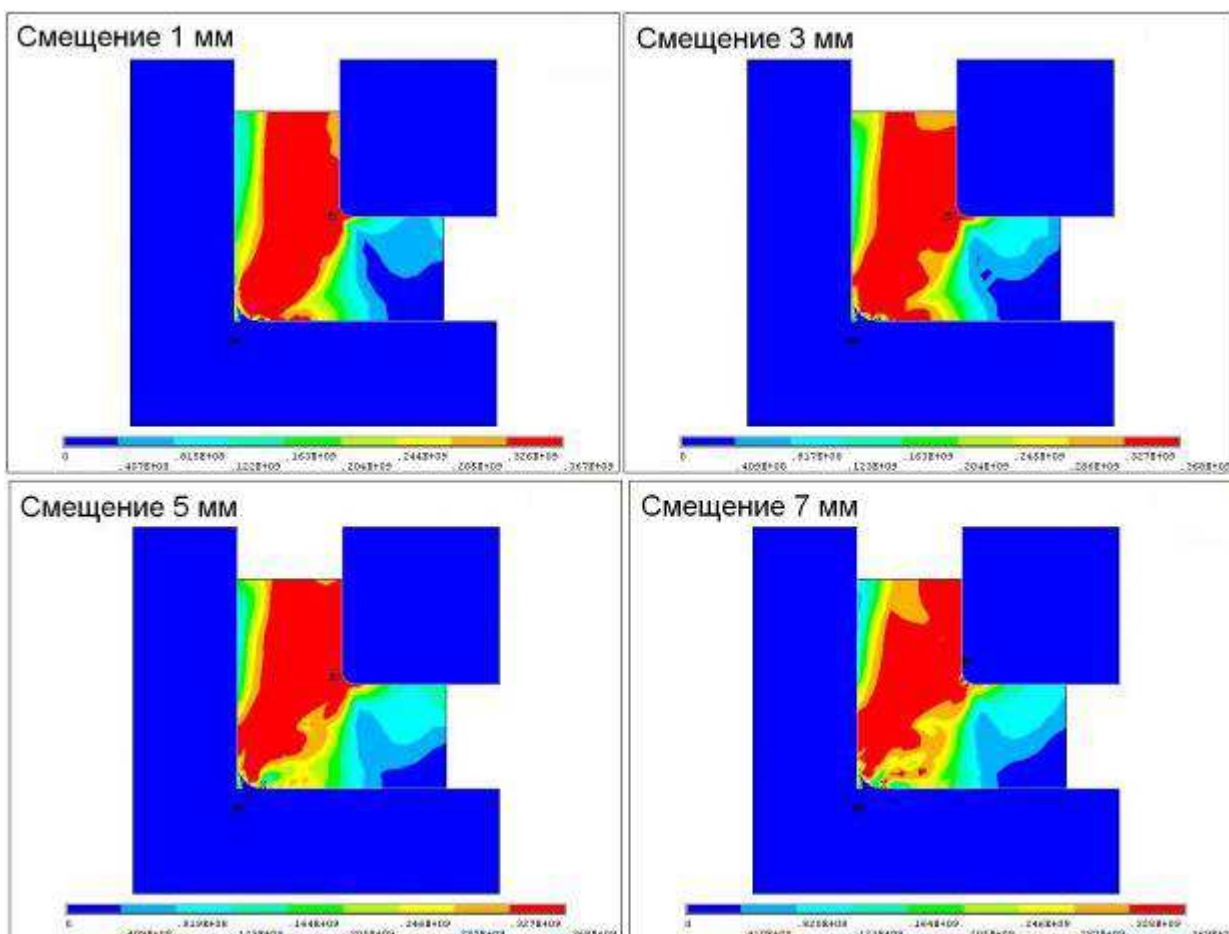


Рис. 2.21. Интенсивность напряжений в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Во всем объеме заготовки возникают только положительные напряжения. Наибольшие значения возникают в зоне от внешнего радиуса к верхней правой части заготовки, причем, с увеличением смещения зона максимальных напряжений немного уменьшается, в частности сужается около внешнего радиуса. Значения напряжения составляют 367, 368, 368 и 369 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно.

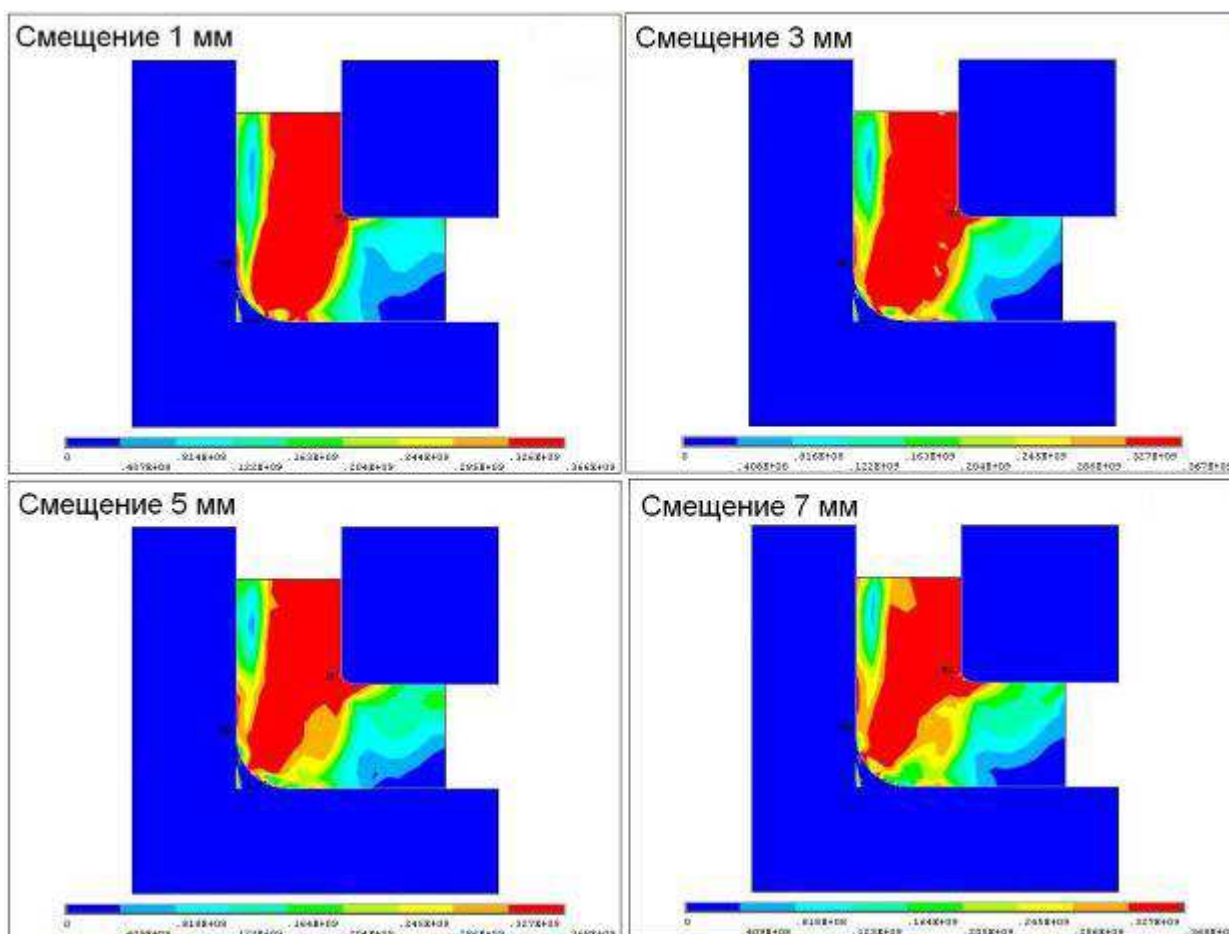


Рис. 2.22. Интенсивность напряжений в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Во всем объеме заготовки возникают только положительные напряжения. Наибольшие значения возникают в зоне от внешнего радиуса к верхней правой части заготовки, причем, с увеличением смещения зона максимальных напряжений немного уменьшается, в частности сужается около внешнего радиуса. Значения напряжения составляют 366, 367, 368 и 368 МПа для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно.

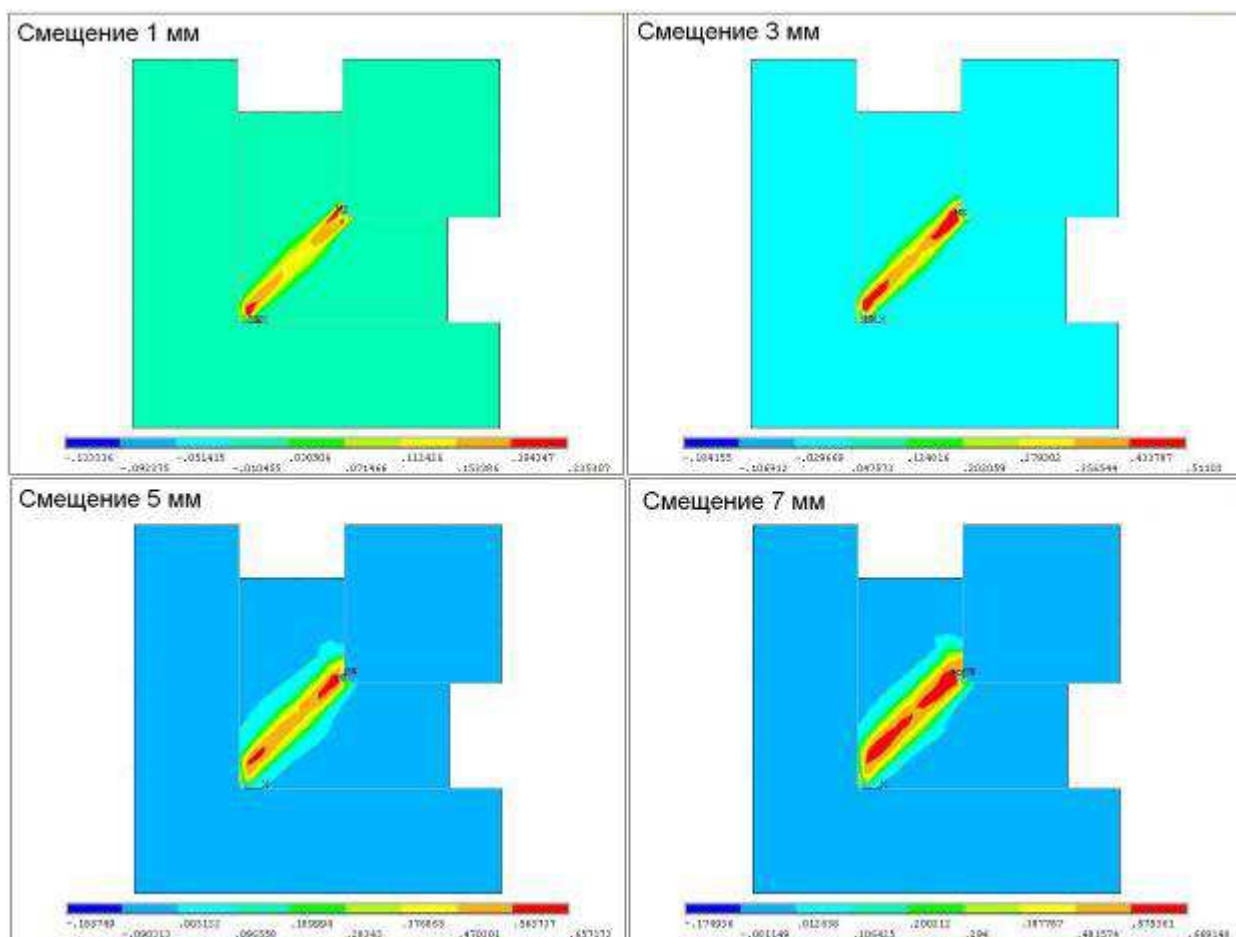


Рис. 2.23. Деформированное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси X растет с увеличением смещения и составляет 0,235, 0,511, 0,657 и 0,669 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. Сжимающие напряжения при данной геометрии отсутствуют. Судя по эпюрам, в заготовке возникают 2 очага деформации около углов матрицы, которые разрастаются с увеличением смещения. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерное.

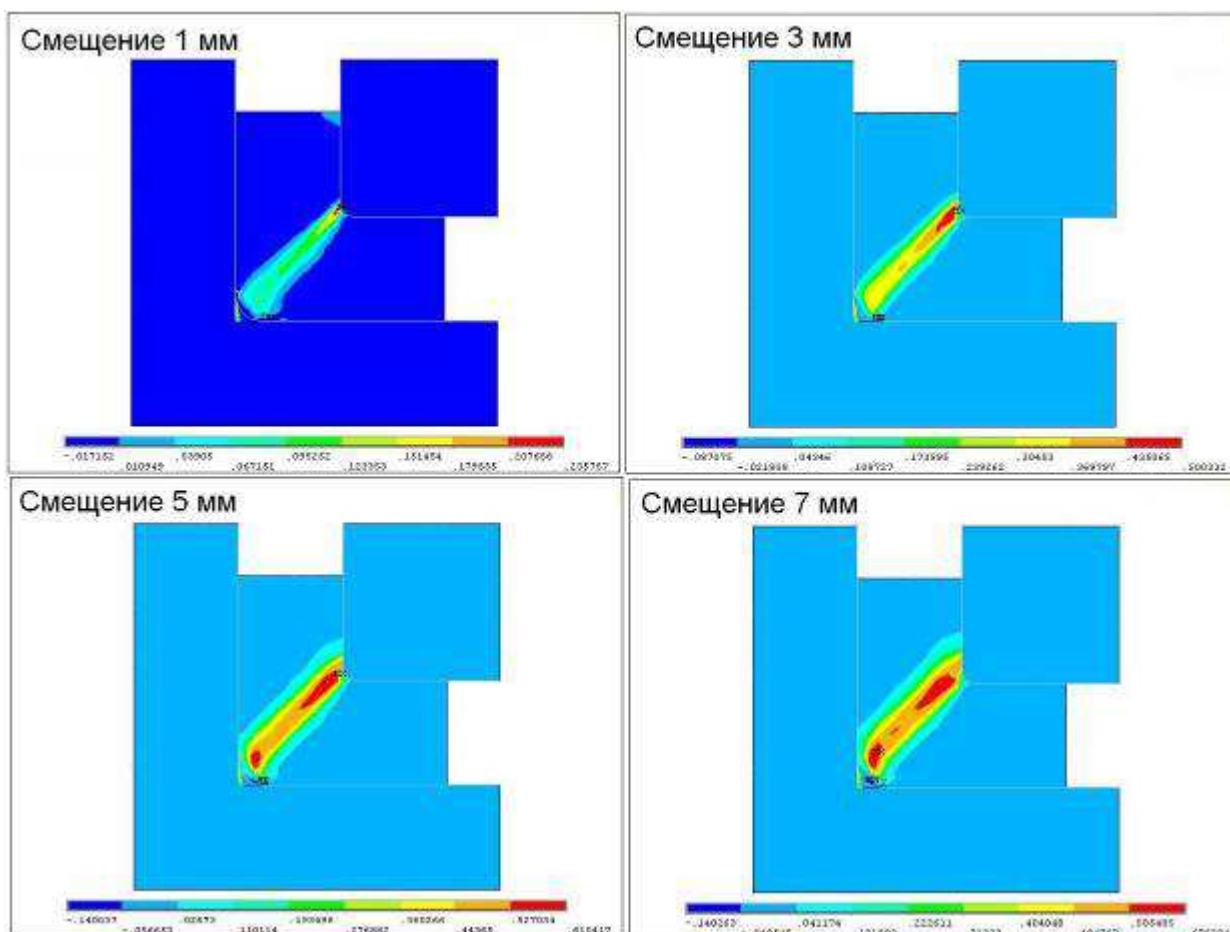


Рис. 2.24. Деформированное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси X растет с увеличением смещения и составляет 0,236, 0,5, 0,61 и 0,676 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. При смещении 5 и 7 мм появляются сжимающие напряжения с интенсивностью -0,14 в районе внешнего угла матрицы. Также возникают 2 очага деформации. Первый около внутреннего угла матрицы появляется после смещения в 1 мм, а второй в районе внешнего угла, возникает после смещения в 5 мм. Очаг около внешнего радиуса менее выражен. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерное.

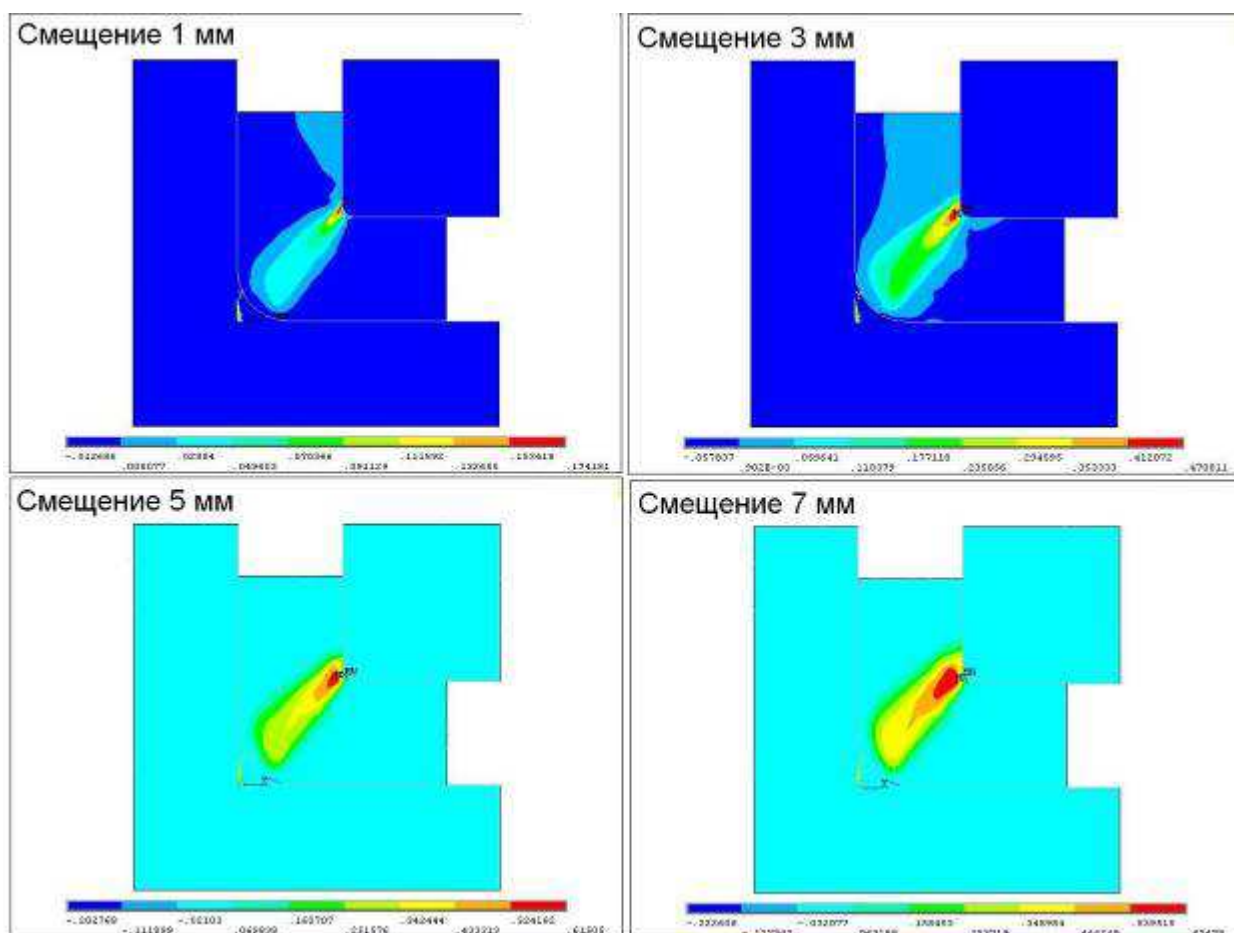


Рис. 2.25. Деформированное состояние по оси X в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси X растет с увеличением смещения и составляет 0,174, 0,47, 0,615 и 0,635 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. При смещении 1 и 3 мм в значительной части объема заготовки присутствуют сжимающие напряжения с интенсивностью -0,012 и -0,057 соответственно. При смещении 5 и 7 мм сжимающие напряжения есть только около внешнего угла матрицы с интенсивностью -0,111 и -0,127 соответственно. Возникает только 1 очаг деформации около внутреннего радиуса, вследствие чего образуется застойная зона в районе внешнего радиуса.

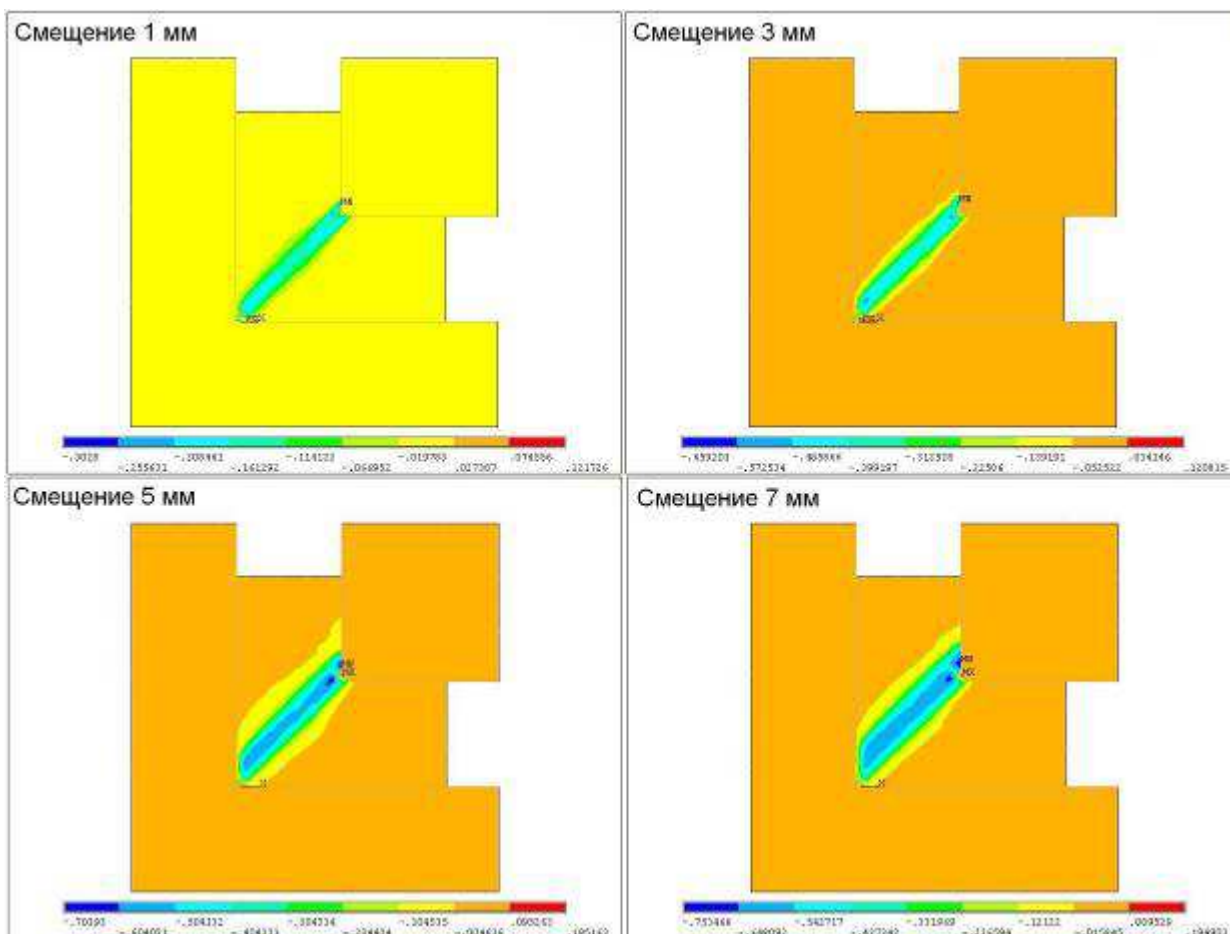


Рис. 2.26. Деформированное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси Y растет с увеличением смещения и составляет -0,302, -0,659, -0,703 и -0,753 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. Для смещения 1 мм все напряжения сжимающие, но начиная со смещения в 3 мм, около внутреннего радиуса появляются растягивающие напряжения с интенсивностью 0,12, 0,1951 и 0,1949 для смещений 3, 5 и 7 мм соответственно. Возле внутреннего радиуса матрицы напряжения резко меняются с растягивающих на сжимающие. Деформации между радиусами распределяются достаточно равномерно.

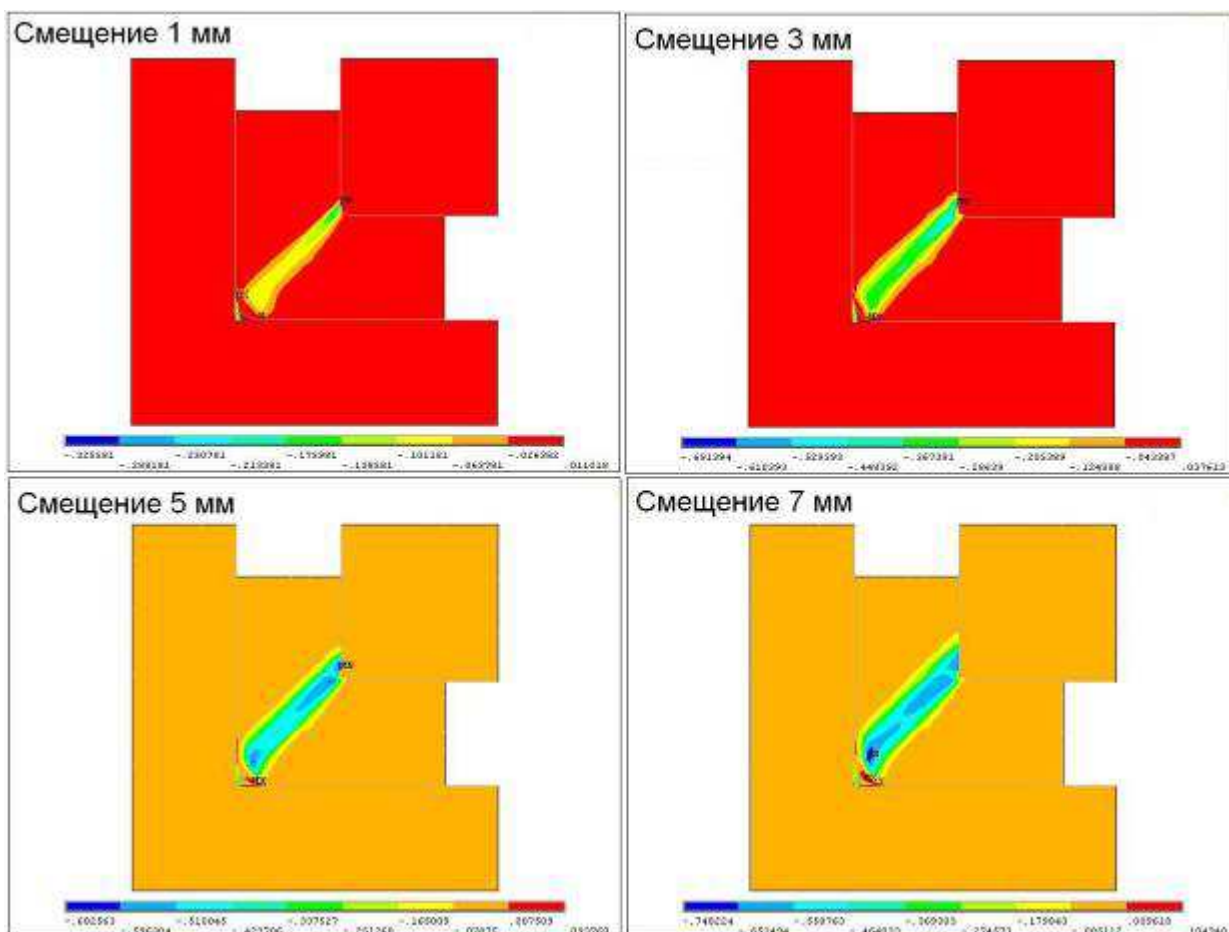


Рис. 2.27. Деформированное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси Y растет с увеличением смещения и составляет -0,213, -0,529, -0,682 и -0,748 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. В основном объеме заготовки при смещении 1 и 3 мм присутствуют незначительные растягивающие напряжения с интенсивностью 0,011 и 0,037 соответственно. При смещении 5 и 7 мм растягивающие напряжения занимают лишь небольшие зоны около радиусов матрицы, их интенсивность составляет 0,093 и 0,104 соответственно. Возле внутреннего радиуса, как и при радиусах 2,5–2,5, напряжения резко меняются с растягивающих на сжимающие. Распределение деформаций между радиусами менее равномерно, чем при радиусах 2,5–2,5.

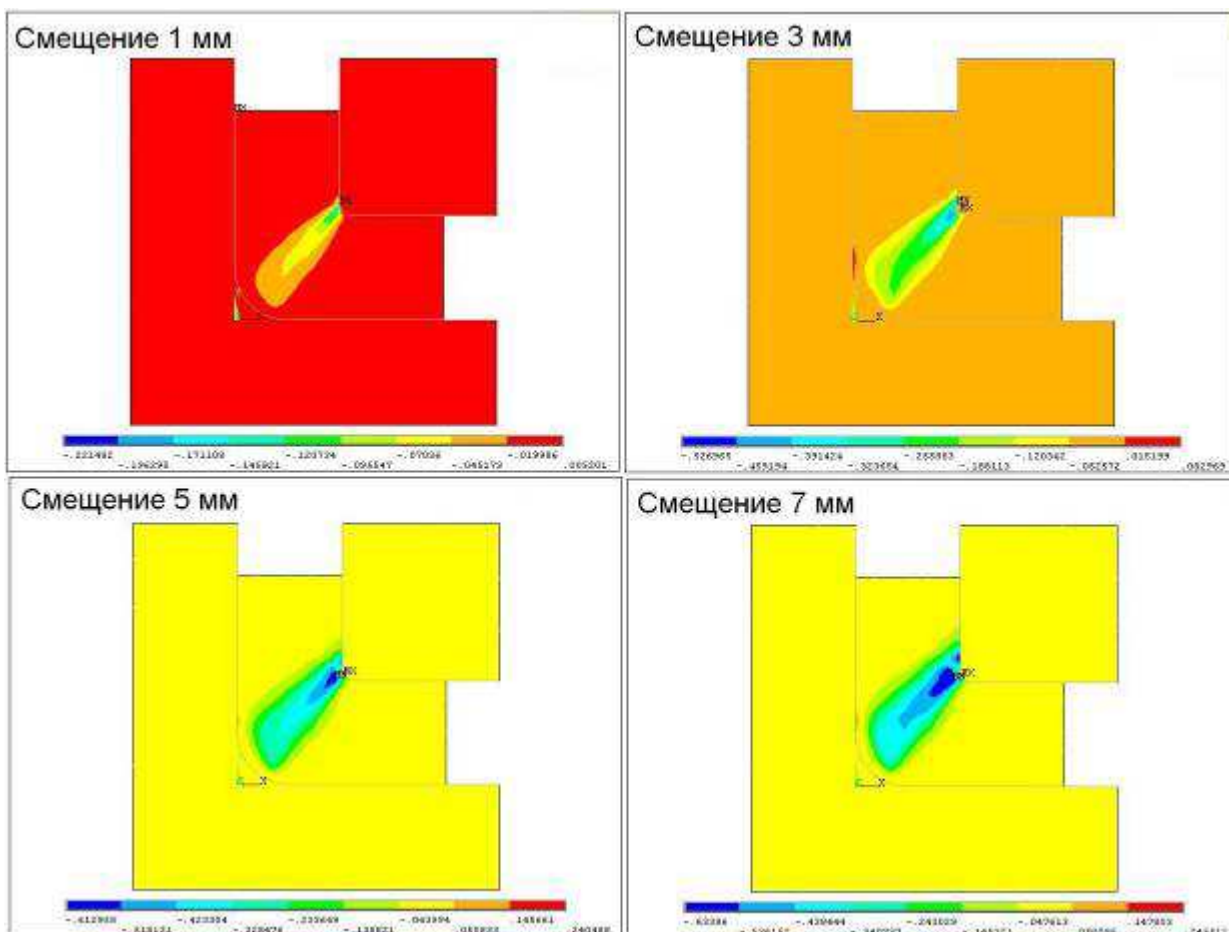


Рис. 2.28. Деформированное состояние по оси Y в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Интенсивность пластических деформаций по оси Y растет с увеличением смещения и составляет -0,146, -0,391, -0,613 и -0,634 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. В основном объеме заготовки при смещении 1 мм присутствуют незначительные растягивающие напряжения с интенсивностью 0,005. При смещениях 3, 5 и 7 мм небольшие растягивающие напряжения присутствуют лишь около внешнего радиуса матрицы, их интенсивность 0,082, 0,05 и 0,05 соответственно. При данной геометрии матрицы возникает явно выраженный очаг деформации около внутреннего радиуса, вследствие чего образуется застойная зона у внешнего радиуса.

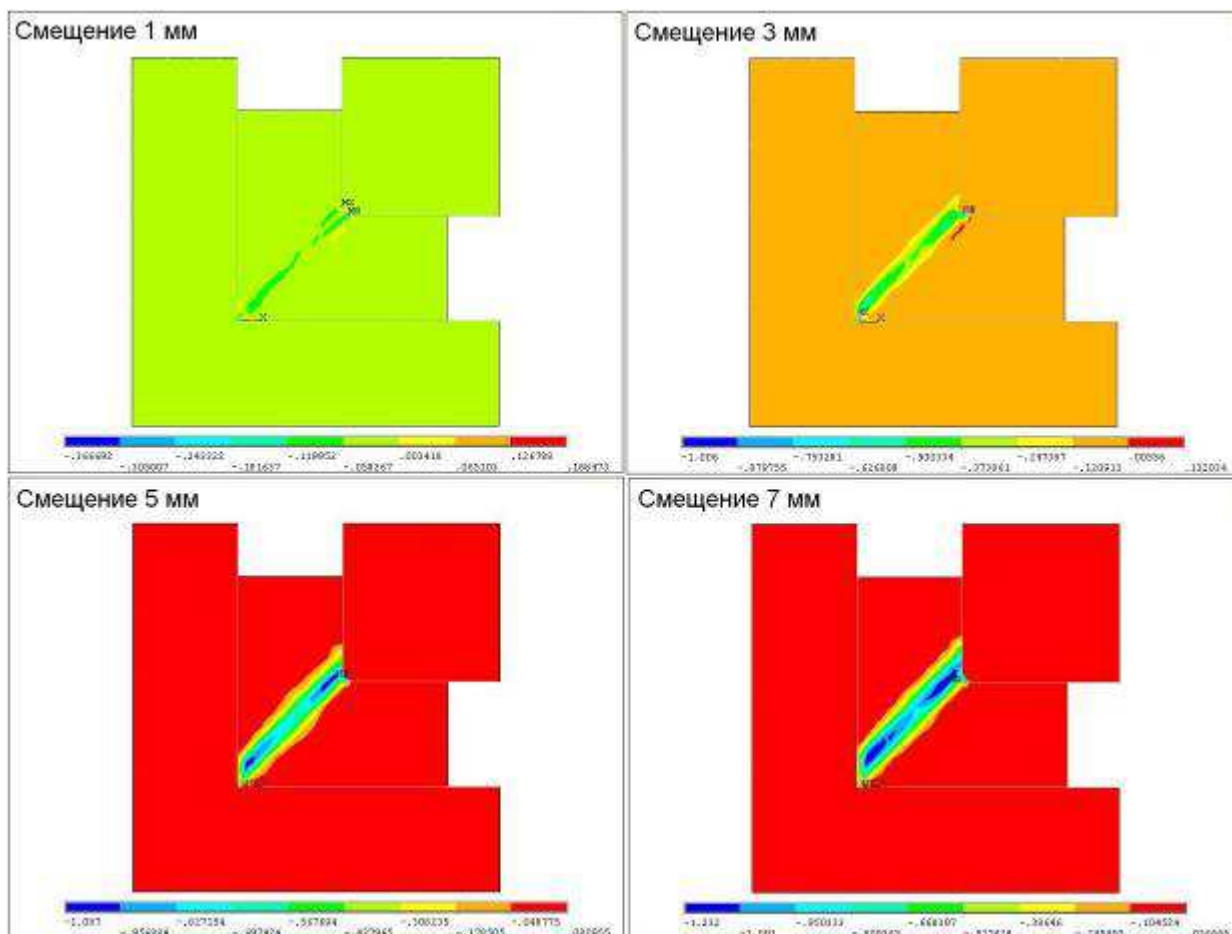


Рис. 2.29. Деформированное состояние в плоскости ХУ в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости ХУ растет с увеличением смещения и составляет -0,243, -1,006, -1,086 и -1,232 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. При смещении 1 и 3 мм возле внутреннего радиуса матрицы присутствует небольшая зона растягивающих напряжений с интенсивностью 0,065 и 0,132 соответственно. При смещении 5 и 7 мм основной объем заготовки занимают небольшие растягивающие напряжения с интенсивностью 0,08 и 0,036 соответственно. Также по мере увеличения смещения формируются и возникают 2 очага деформации в радиусах заготовки. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерное.

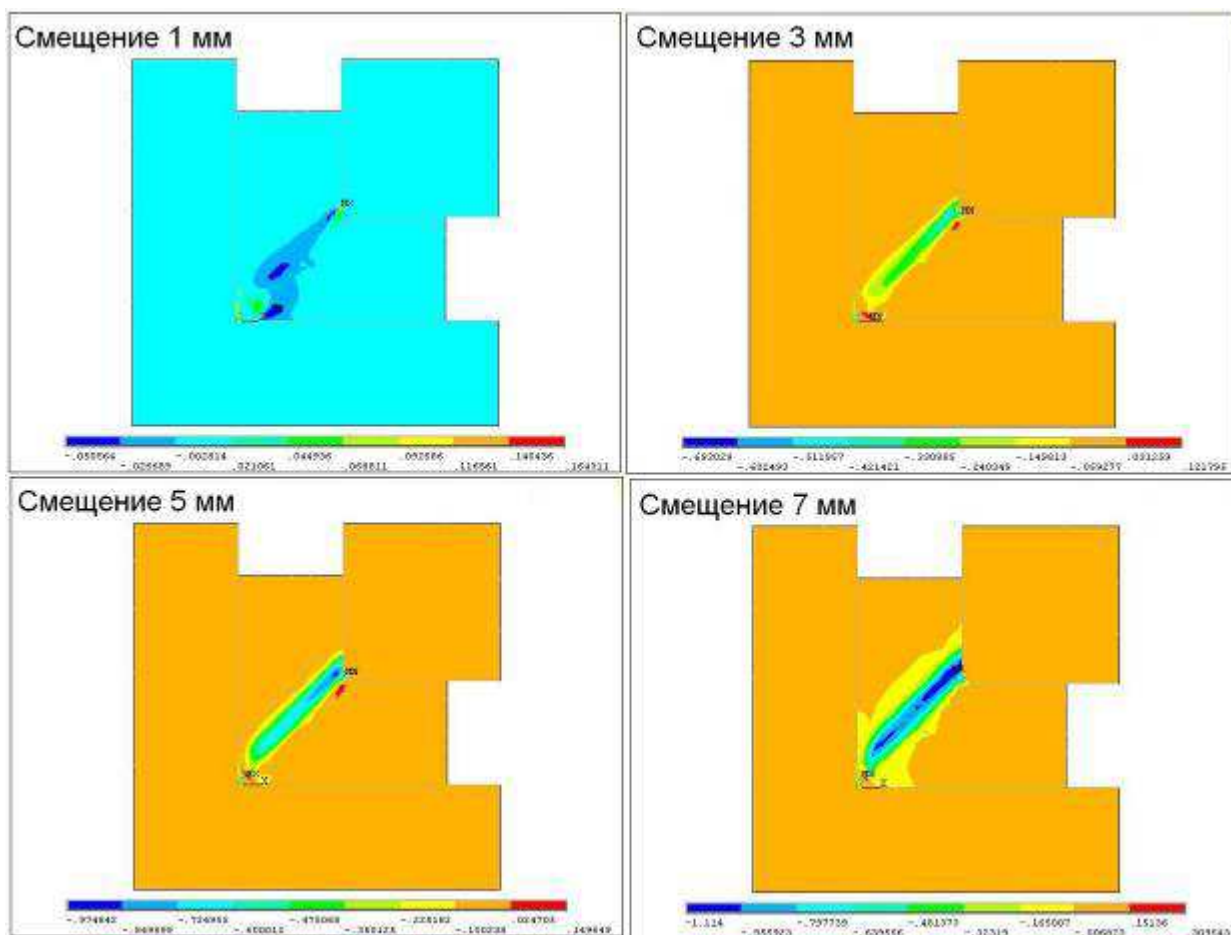


Рис. 2.30. Деформированное состояние в плоскости ХУ в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости ХУ растет с увеличением смещения и составляет -0,05, -0,693, -0,975 и -1,114 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. При смещении 1, 3 и 5 мм в заготовки присутствуют небольшие зона с растягивающими напряжениями с интенсивностью 0,092, 0,122 и 0,15 соответственно. При смещении 7 мм растягивающих напряжений нет. Также по мере увеличения смещения формируются и возникают 2 очага деформации в радиусах заготовки. Очаг внешнего радиуса менее выражен. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерное.

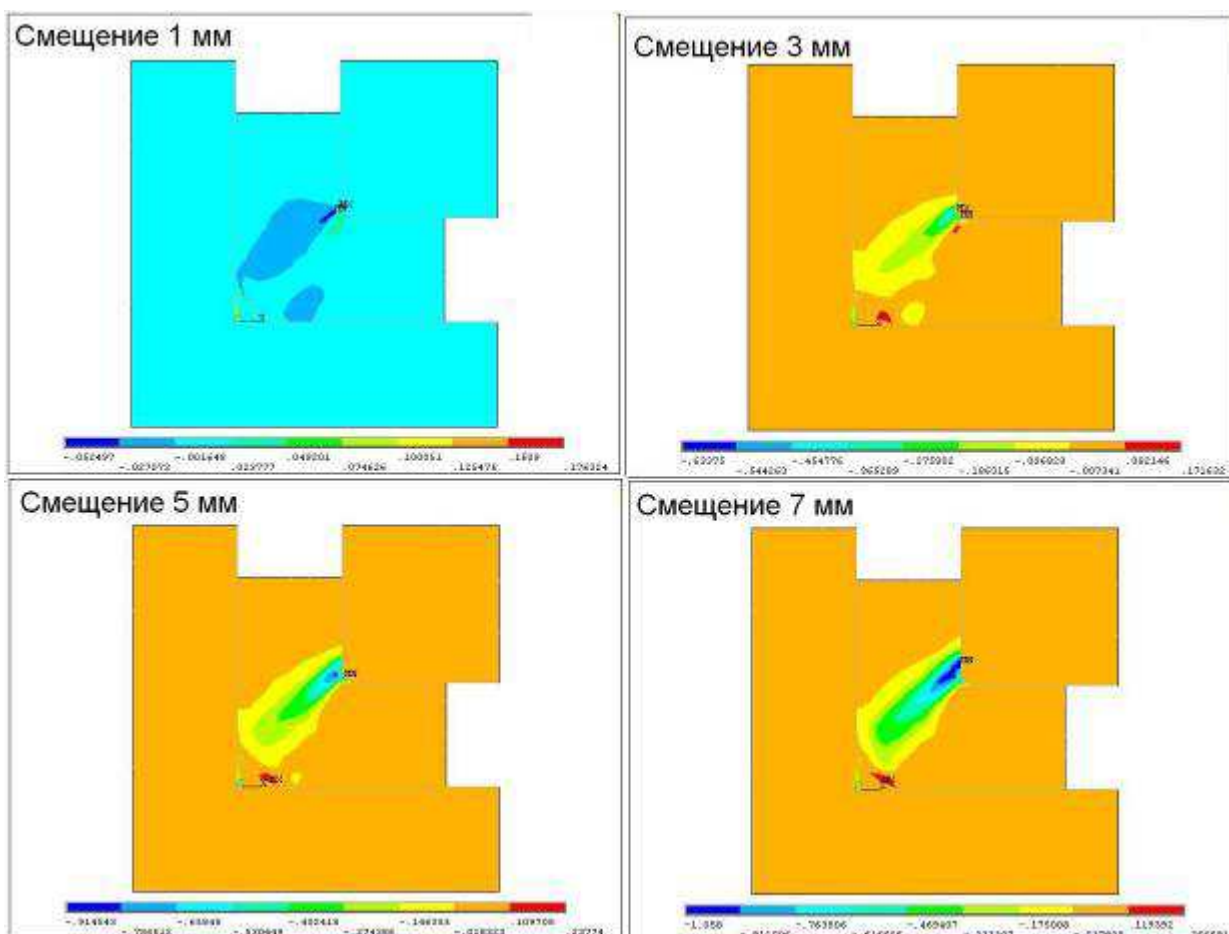


Рис. 2.31. Деформированное состояние в плоскости ХУ в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости ХУ растет с увеличением смещения и составляет -0,052, -0,634, -0,916 и -1,058 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. При смещении 1 мм около внутреннего радиуса присутствует небольшая зона растягивающих напряжений с интенсивностью 0,049. При смещении 3 мм присутствуют 2 зоны растягивающих напряжений, возле радиусов матрицы, с интенсивностью 0,171. Для смещений 5 и 7 мм небольшая зона растягивающих напряжений с интенсивностью 0,238 и 0,267 присутствует только в районе внешнего радиуса матрицы. По мере увеличения смещения формируется 1 очаг деформации в зоне внутреннего радиуса, вследствие чего образуется застойная зона в районе внешнего радиуса.

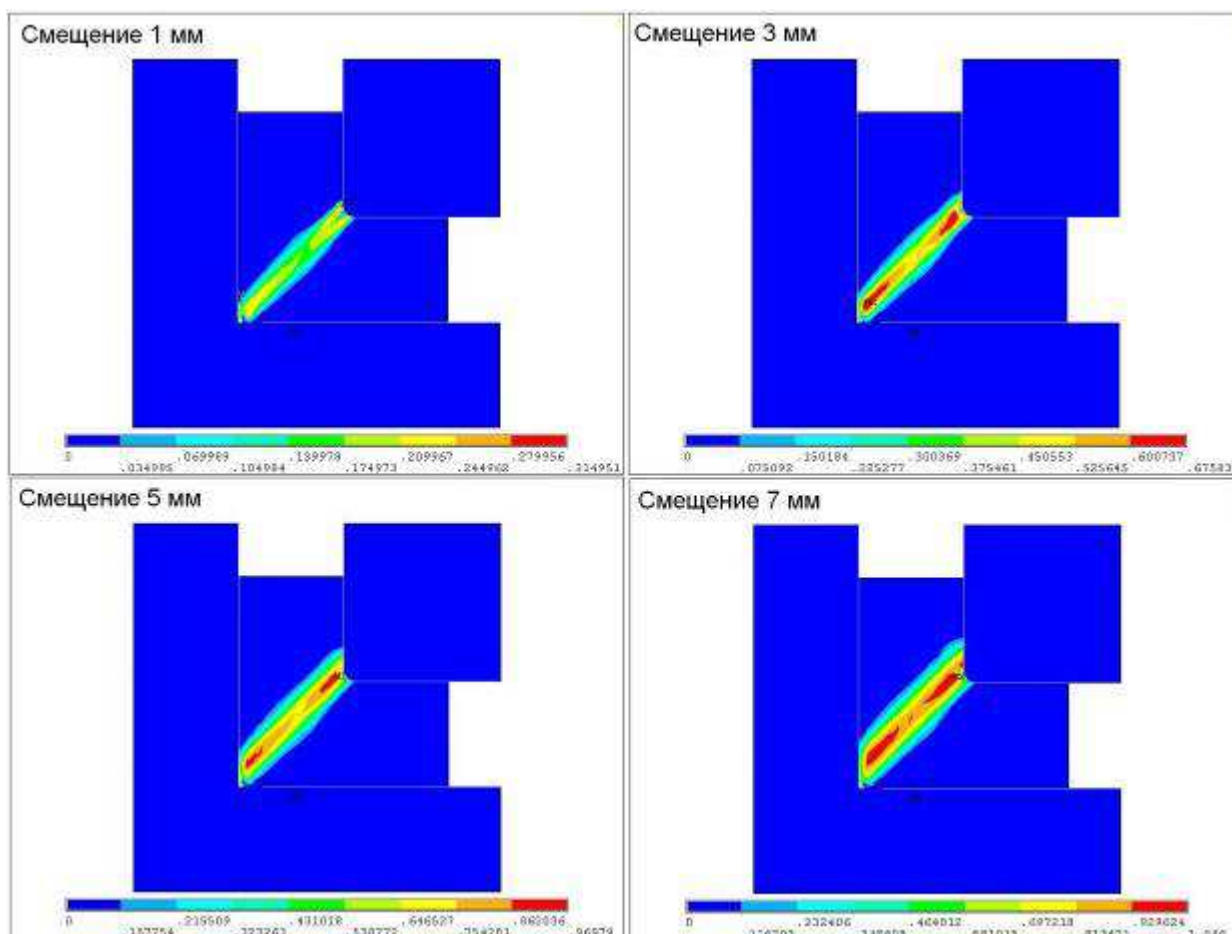


Рис. 2.32. Интенсивность деформаций в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 2,5–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости XY растет с увеличением смещения и составляет 0,315, 0,676, 0,97 и 1,046 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. По мере увеличения смещения формируются и развиваются 2 очага деформации в районах радиусов матрицы. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерно.

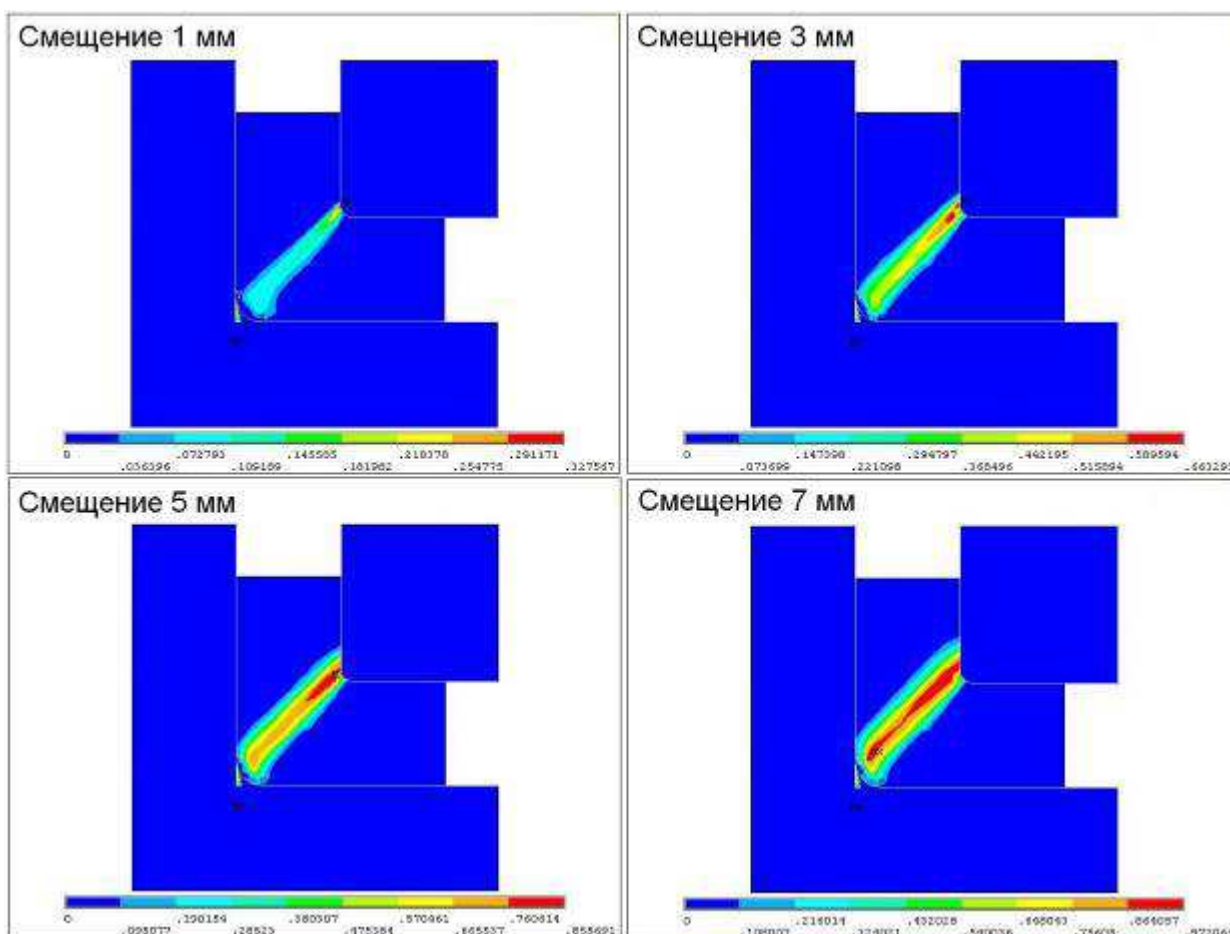


Рис. 2.33. Интенсивность деформаций в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 5–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости XY растет с увеличением смещения и составляет 0,328, 0,663, 0,856 и 0,972 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. По мере увеличения смещения формируются и развиваются 2 очага деформации в районах радиусов матрицы. Очаг у внешнего радиуса замечен только при смещении 7 мм. В целом распределение деформаций между радиусами достаточно равномерно.

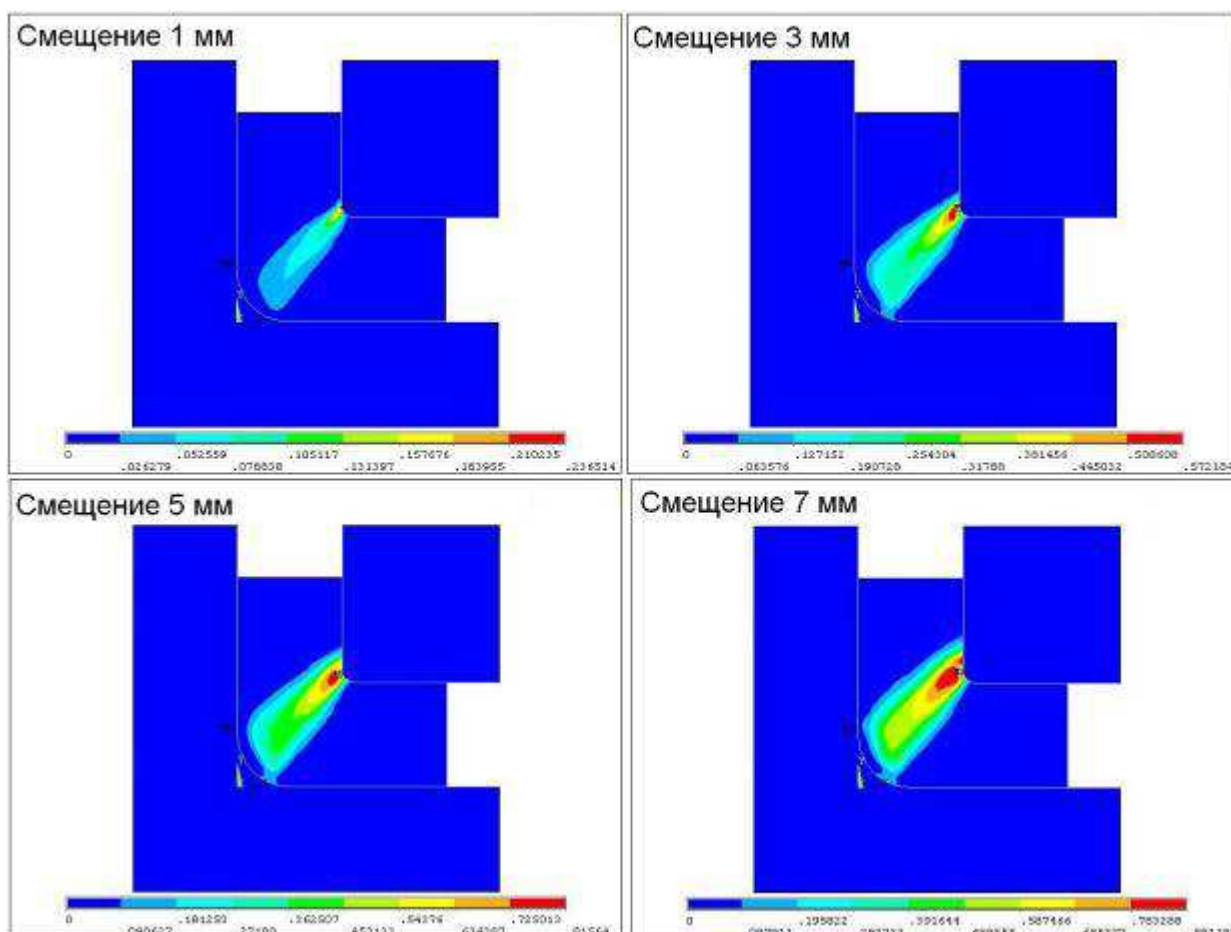


Рис. 2.34. Интенсивность деформаций в зависимости от величины приложенного смещения при радиусах 10–2,5

Интенсивность пластических деформаций в плоскости XY растет с увеличением смещения и составляет 0,237, 0,572, 0,816 и 0,881 для смещений 1, 3, 5 и 7 мм соответственно. По мере увеличения смещения формируется и развивается очаг деформации в районе внутреннего радиуса матрицы, вследствие чего образуется застойная зона в районе внешнего радиуса матрицы.

Полученные данные сопоставимы с экспериментальными исследованиями, в частности данными описанными в работе [9-10]. Вышеописанное моделирование показало, что радиус матрицы действительно заметно влияет на распределение напряжений и степень накопленной деформации. Уменьшение внешнего радиуса привело к тому, что распределение напряжений в очаге деформации стало менее

равномерным, чем при больших радиусах. Если при внешнем радиусе 10 мм не наблюдалось резких изменений с положительных на отрицательные напряжения и наоборот, то при моделировании обработки с внешним радиусом 2,5 мм данное явление имело место, что при реальной обработке, скорее всего привело бы к получению неоднородной УМЗ структуры. Накопленная деформация при увеличении внешнего радиуса также уменьшается, а при радиусе 10 мм возникает застойная зона у внешнего радиуса, что тоже сопоставимо с экспериментальными данными [2].

Анализ, полученных в результате моделирования данных показывает:

1) Разработана методика конечно-элементного моделирования равноканального углового прессования. Особенностью методики является то, что внутренний радиус матрицы оставался постоянным, а внешний менял свое значения в каждой из трех моделей.

2) Распределение и значения интенсивности напряжений не сильно отличаются для всех трех типов геометрии матрицы. По оси X значение как растягивающих, так и сжимающих напряжений растет с увеличением внешнего радиуса. По оси Y для внешнего радиуса 5 мм значение напряжений минимально. В плоскости XY значение отрицательных напряжений примерно одинаково, а положительные растут с увеличением внешнего радиуса. В целом распределение напряжений более равномерно для большего значения внешнего радиуса.

3) Степени деформации уменьшаются с увеличением внешнего радиуса матрицы и по осям X и Y, и в плоскости XY, а также интенсивность деформаций. Для внешнего радиуса 2,5 мм четко видно образование двух очагов деформаций около радиусов матрицы, причем с увеличением смещения они сливаются в одну линию, распределение деформаций между радиусами равномерно. Для внешнего радиуса 5 мм также видно образование двух очагов деформаций, но очаг около внешнего радиуса формируется позже, чем для радиуса 2,5 мм. Как следствие – чуть меньшая однородность деформаций между радиусами. Для внешнего радиуса 10 мм формируется

только 1 очаг деформаций – около внутреннего радиуса, поэтому возникает неоднородность деформаций между радиусами. Как следствие – вероятность появления застойной зоны около внешнего радиуса.

4) Общий вывод по моделированию: геометрия матрицы с радиусами 2,5–2,5 обеспечивает большие степени и большую однородность распределения деформаций, следовательно более эффективна для получения наноструктур. Геометрия матрицы с радиусами 5–2,5 занимает промежуточное место между геометриями 2,5–2,5 и 10–2,5. Хотя при геометрии матрицы 10–2,5 степени деформаций и их однородность между радиусами меньше, распределение напряжений более благоприятное, следовательно, рекомендуется рассмотреть возможность обработки заготовки с данной геометрией по маршруту С, с поворотом на 180° для устранения возможной застойной зоны около внешнего радиуса.

5) В общем, как отмечалось ранее, меньший радиус матрицы приводит к тому, что распределение напряжений становится менее однородным, напряжения имеют тенденцию меняться резко с положительных на отрицательные. Следовательно, полученные результаты сопоставимы с другими исследованиями в данной области [2].

6) Для реализации деформационного наноструктурирования необходимым условием является осуществление деформации сдвига в условиях сжатия.

2.2. Экспериментальные исследования свойств металла изделий в мелкодисперсном состоянии после совмещенной обработки интенсивной пластической деформацией методом кручения в условиях сжатия

По результатам проведения экспериментов на образцах, полученных при созданной схеме обработки, было решено изменить схему обработки, а именно изменять угол между осями вращения обоих валов.

Результаты металлографических исследований образцов показали наличие в проволоке остаточных следов волочения, а также незначительное

количество зёрен с размерами в пределах 200 нм. На основании этого было принято решение о применении рекристаллизационного отжига для устранения следов волочения, а также увеличения размера зерна. Отжиг проводился при температуре 600°C в течении 5 мин.

Для проверки влияние противодавления создаваемого роликами на упрочнение и разориентировку зерен были проведены испытания по схеме без роликов.

В результате, были проведены следующие испытания:

1. Обработаны образцы при новой схеме при режиме 20 градусов и 1 проход.
2. Обработаны образцы при новой схеме, но без дополнительной пары роликов при режиме 20 градусов и 1 проход.
3. Обработаны образцы после отжига при режиме 20 градусов по новой схеме

Список образцов испытываемых на разрыв приведён в таблице 2.1 в которой Н.С. – образцы полученные по новой схеме без отжига; О.–отожжённые образцы, обработанные по новой схеме; остальные образцы обработаны по старой схеме.

Таблица 2.1

образец	режим	Маркировка
1	недеформированный	нд
2	15 град. 3 прох.	15х3
3	20 град 3 прох	20х3
4	Н.С. 20 град. 1 прох.	Н20с
5	О. недеформ.	Онд
6	О. 0 град. 1 прох.	О0
7	О. 15 град. 1 прох.	О15
8	О. 15 шрад. 3 прох.	О15х3

Испытания производились методом подвешивания грузов на подвес. Для разрыва использовались грузы весом 2, 5, 7 и 10 кг. Образец (1)

зажимался в специальных зажимах (2) (рис. 2.35) и далее на подвес постепенно навешивались грузы.

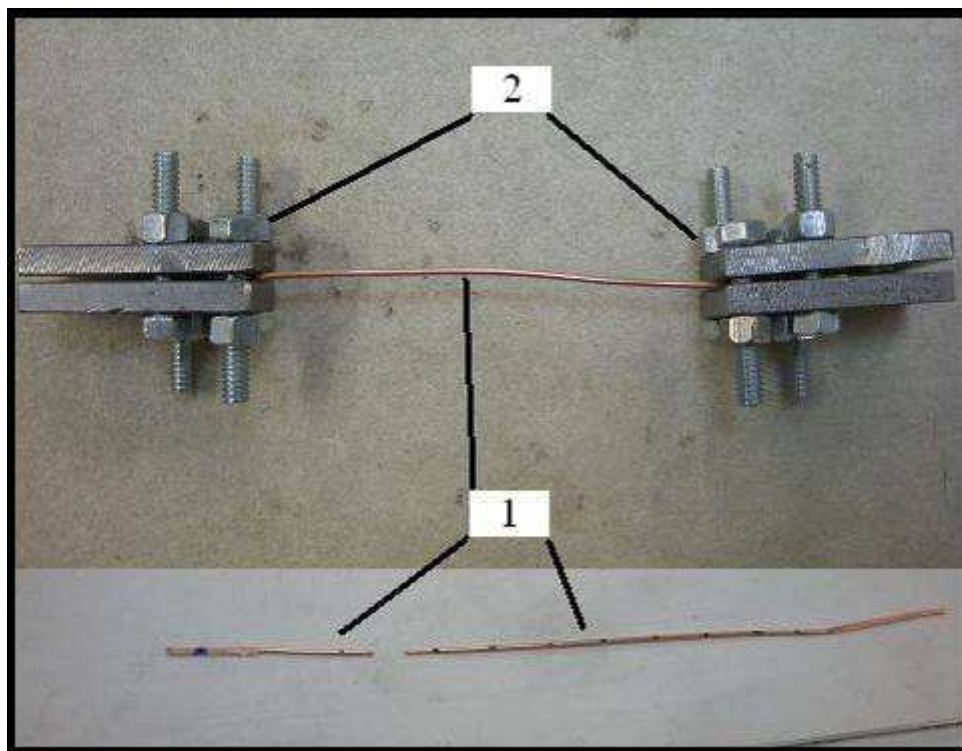


Рис. 2.35. Образец до и после разрыва

2.2.1. Результаты экспериментальных исследований размеров зёрен образцов

Для проведения металлографических исследований были выбраны 3 образца (недеформированный, деформированный 3 раза при угле 0 градусов, деформированный 3 раза при угле 20 градусов). В результате были получены следующие данные:

Cu(H) необработанный.

Зерна – анизотропные и вытянут вдоль оси проволоки. Средний размер зерен 1,2x4,2 мкм. Мелкие зерна практически, полностью фрагментированы, крупные зерна фрагментированы только в стыках зерен. Средний размер фрагментов 490 нм. Микродифракционные картины, полученные с фрагментированных участков – монокристаллические, присутствует преимущественно одна плоскость, тяжи на рефлексах, отсутствуют. Это

свидетельствует о том, что фрагменты практически не разориентированы относительно друг друга.

Cu (0x3) обработанные на минимальных режимах.

Практически все зерна фрагментированы. Средний размер фрагментов 510 нм. Более высокие значения объясняются тем, что крупные зерна, в отличие от Cu(H), оказываются полностью или частично фрагментированными. При этом размер фрагментов в крупных зернах выше, чем в мелких. Микродифракционные картины - также монокристаллические.

Cu (20x3) обработанный на максимальных режимах.

Все зерна фрагментированы. Фрагменты измельчаются, их средний размер составляет 450 нм. Микродифракционные картины, по-прежнему, монокристаллические, но на рефлексах присутствуют тяжи в виде «крестов». Это свидетельствует об идущих в твердом растворе превращениях.

По результатам металлографии можно сделать следующие выводы:

а. В недеформированных образцах уже есть частично фрагментированные зерна, так как для исследований была использована холоднокатанная медная проволока.

б. В образцах, обработанных при режиме 0 градусов зерна фрагментированы незначительно, так как отсутствует закручивание проволоки, вследствие чего отсутствует сдвиг, угловая и линейная скорости не меняются. Таким образом, сдвиг приводит к изменению структуры зерен и способствует их фрагментации.

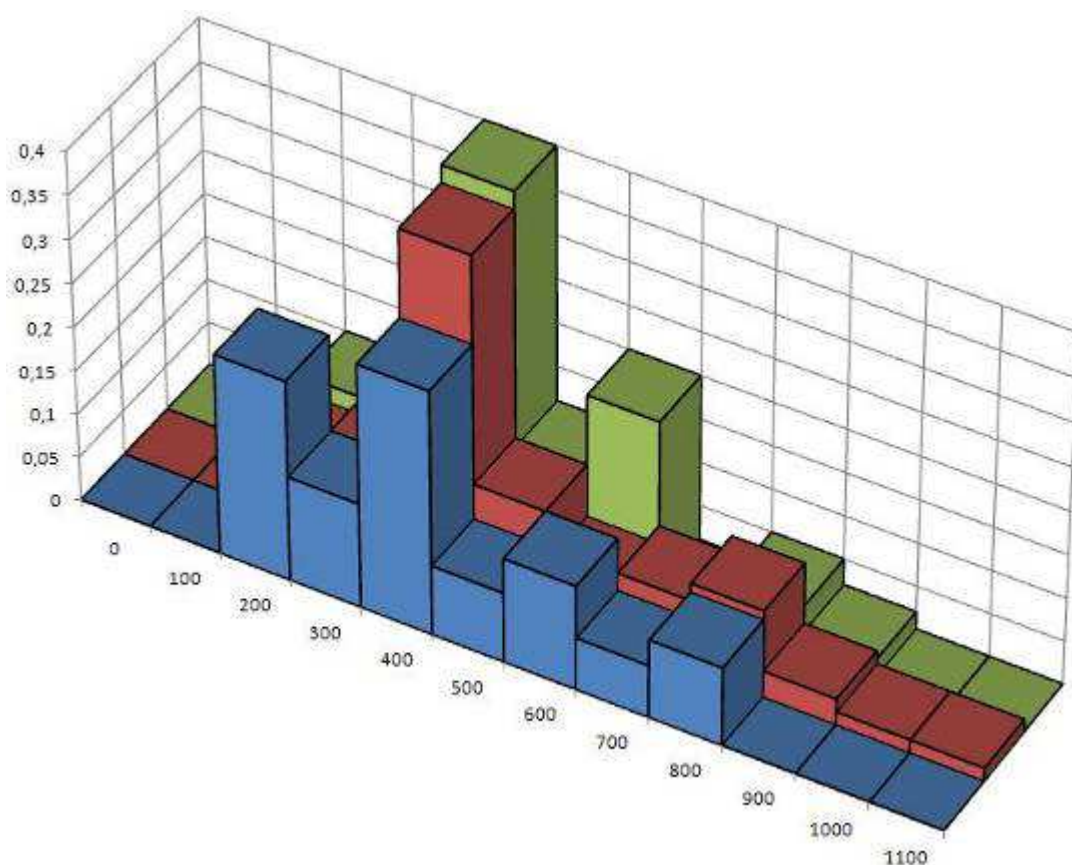


Рис. 2.36. Гистограмма распределения зерен; зеленый – недеформированный образец, красный – деформированный 3 раза при угле 0 градусов, синий – деформированный 3 раза при угле 20 градусов; ось Y – %, ось X – мкм

2.2.2. Результаты экспериментальных исследований микротвёрдости образцов

Испытания производились для образцов, обработанных при углах 0, 15 и 20 градусов. Для каждого режима количество проходов менялось от 1 до 3. В результате можно было проследить эволюцию твердости в зависимости от количества проходов для трех разных режимов. После измерения микротвердости были построены графики твердости, поперечные и осевые, посчитаны средние значения твердости, а также среднеквадратические отклонения.

Таблица 2.2

Средние значения микротвердостей

Образец	Значение микротвердости
Нд	1037
0 градусов 1 проход	820
0 градусов 2 прохода	1213
0 градусов 3 прохода	1029
15 градусов 1 проход	903
15 градусов 2 прохода	1110
15 градусов 3 прохода	1165
20 градусов 1 проход	790
20 градусов 2 прохода	1537
20 градусов 3 прохода	1205

Таблица 2.3

Среднеквадратические отклонения

Образец	Значение среднеквадратического отклонения микротвердости
Нд	208
0 градусов 1 проход	131
0 градусов 2 прохода	176
0 градусов 3 прохода	141,3
15 градусов 1 проход	120,7
15 градусов 2 прохода	166,4
15 градусов 3 прохода	119,8
20 градусов 1 проход	119,8
20 градусов 2 прохода	242,5
20 градусов 3 прохода	150,6

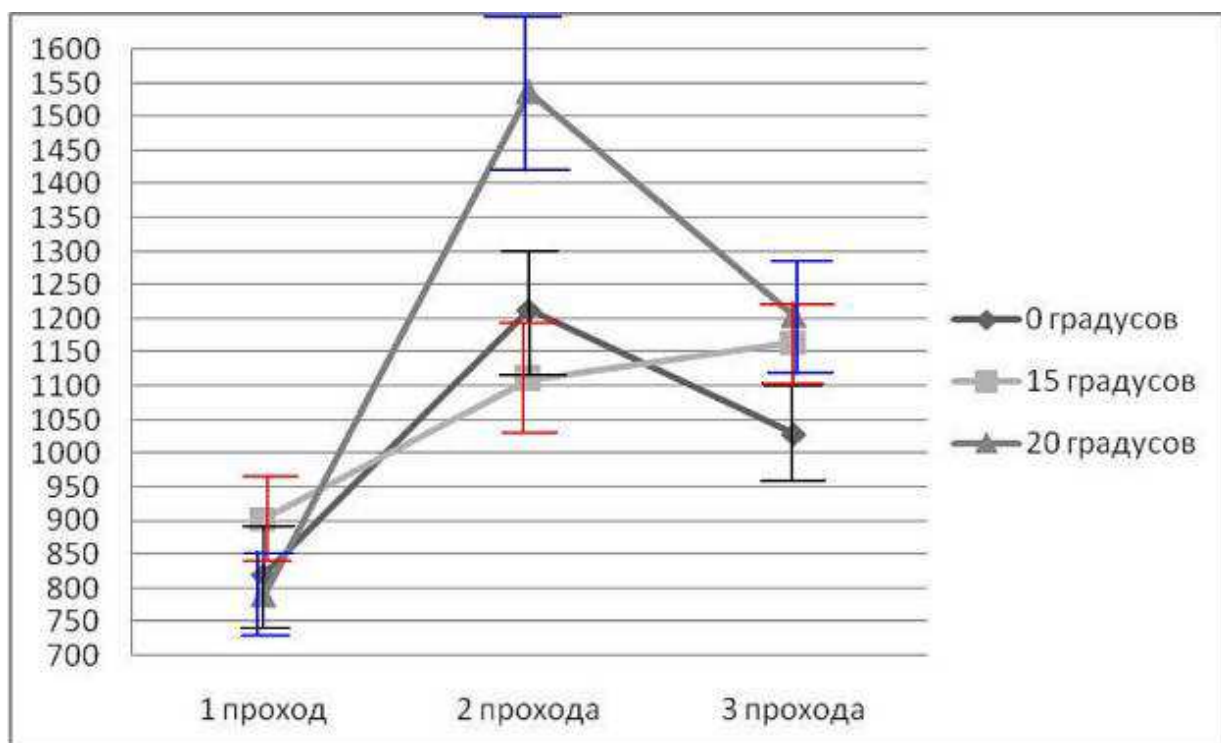


Рис. 2.37. График зависимости средней твердости образца от количества проходов, среднеквадратические отклонения показаны черным – 0 градусов, красным – 15 градусов, синим – 20 градусов

В итоге можно сделать следующие выводы:

1. После 1-го прохода образца ничего нельзя сказать определенно, так как твердость там, как правило, падает ниже, чем у недеформированного образца.
2. После 2-го прохода значение твердости значительно вырастает по сравнению с 1-м проходом, но также вырастает и разброс значений. Среднее значение твердости растет с увеличением угла. Исключением является уменьшение твердости между 0 и 15 градусов, возможна погрешность измерения.
3. После 3-го прохода разброс значений заметно уменьшается, но с ним уменьшается и средняя твердость образца. Исключение – образец с 15 градусами. Средняя твердость растет с увеличением угла между валками.

4. Наиболее упорядоченными смотрятся результаты для образца с 15 градусами. У него и падение твердости после 1-го прохода меньше и рост твердости между проходами постепенный.

5. В образцах с 0 и 20 градусами общее среднеквадратичное отклонение сначала уменьшалось по сравнению с недеформированным образцом, после 2-го прохода возрастало, а после 3-го уменьшалось.

6. В образце с 15 градусами после 1-го прохода среднеквадратичное отклонение становилось меньше, чем у недеформированного образца, а после 2-го и 3-го увеличивалось.

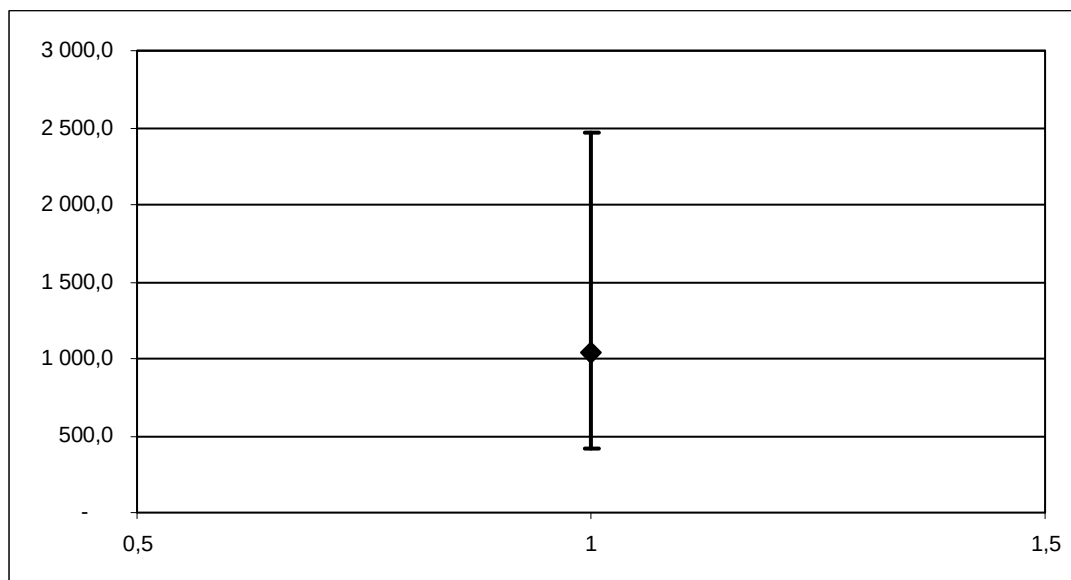
Для образцов обработанных по 2-м разным схемам деформирования были проведены измерения микротвердости 5 рядов по 5 замеров. Результаты измерений приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

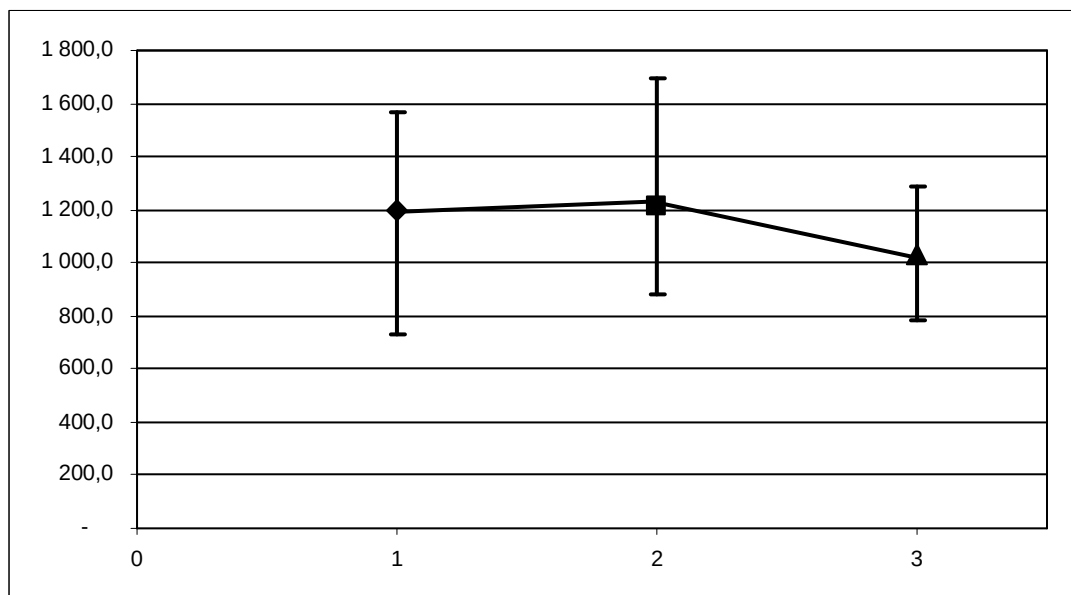
Образец	Среднее значение микротвердости	Значение среднеквадратического отклонения
20 градусов с роликами	1200	164
20 градусов без роликов	858	155

Полученные данные показывают, что дополнительные ролики придают значительное упрочнение, вследствие того, что ролики замедляют линейную и угловую скорость, что позволяет реализовать сдвиг в условиях сжатия.

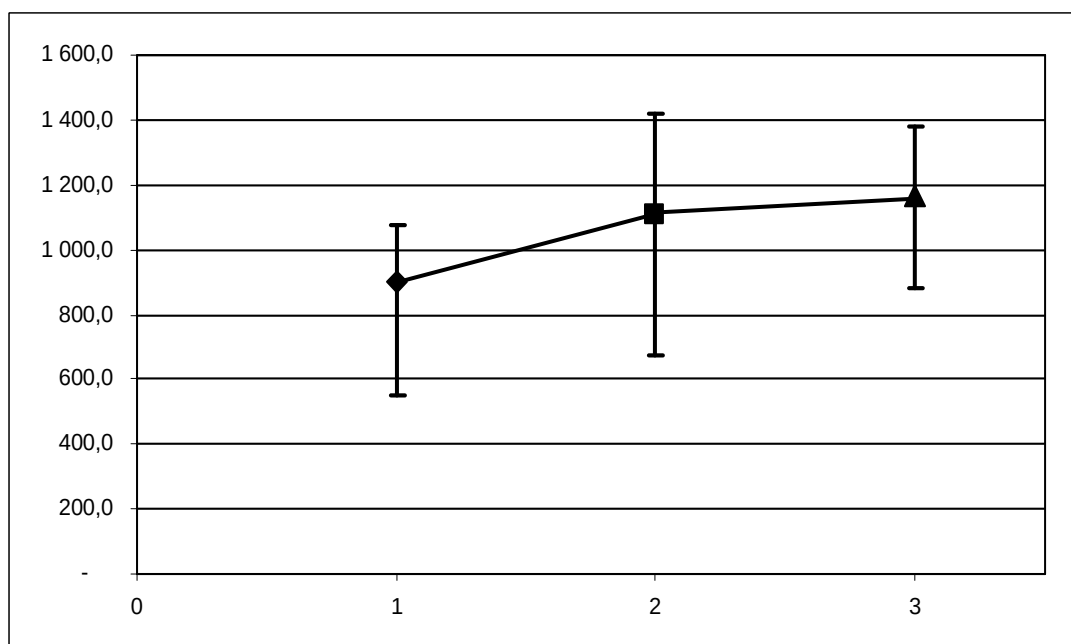
a)



б)



в)



г)

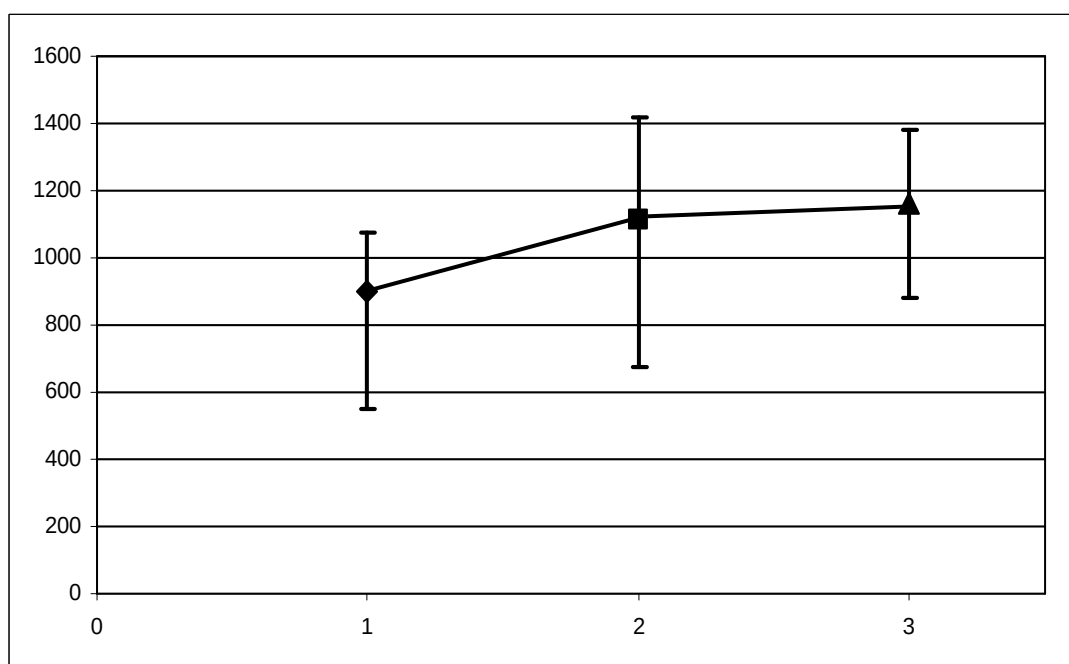
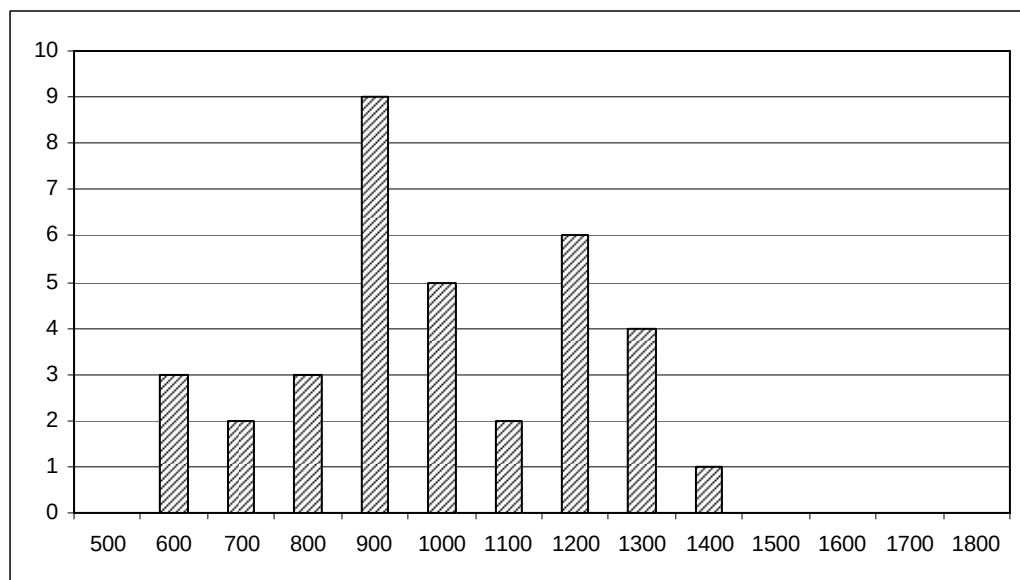
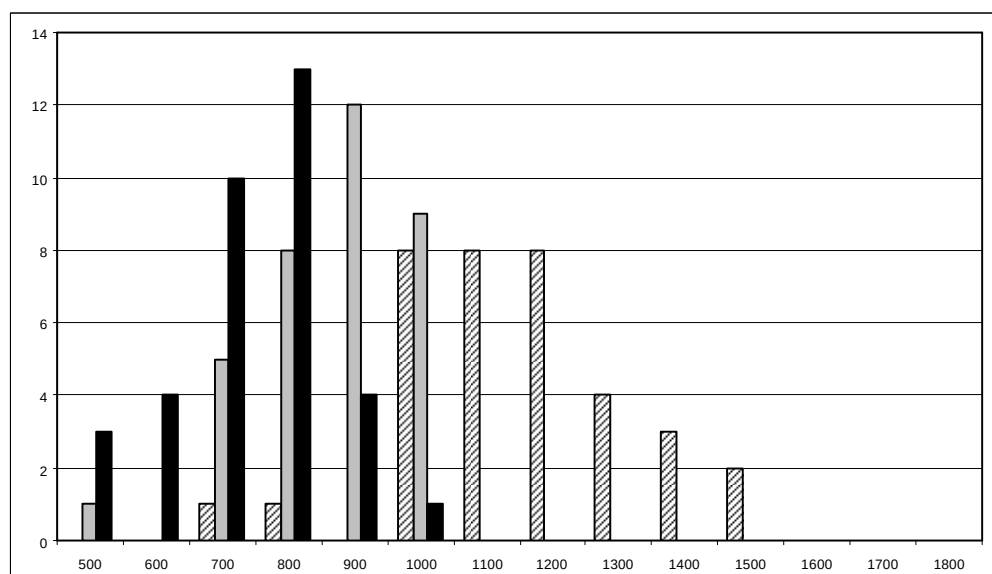


Рис. 2.38. Средняя, максимальная и минимальная твёрдость в каждом образце. По оси X отложено количество проходов. а) недеформированный образец; б) угол пересечения осей валков 0° ; в) угол пересечения осей валков 15° ; г) угол пересечения осей валков 20°

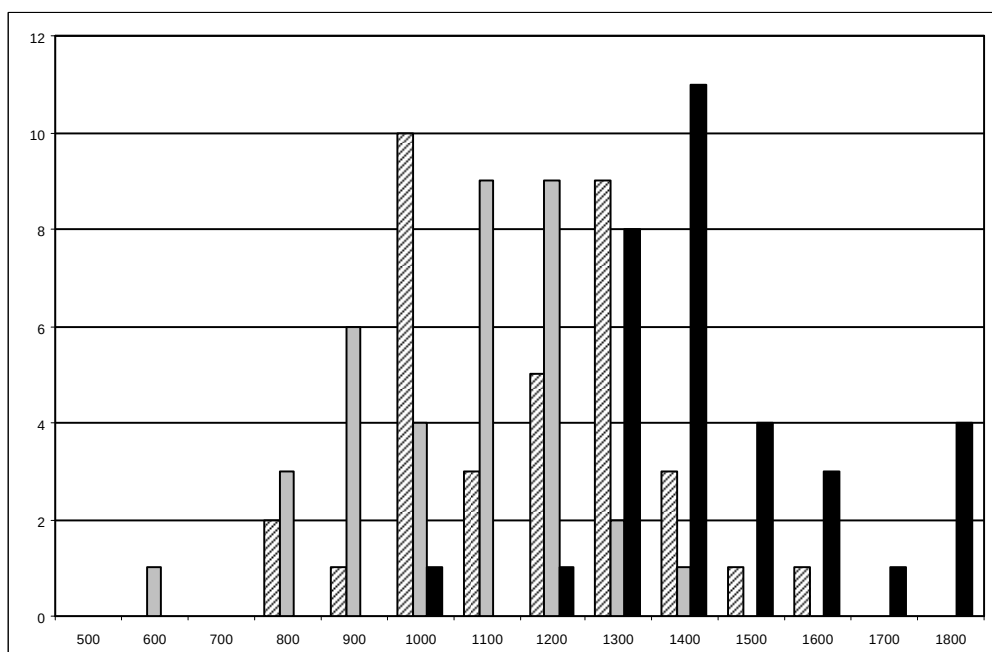
a)

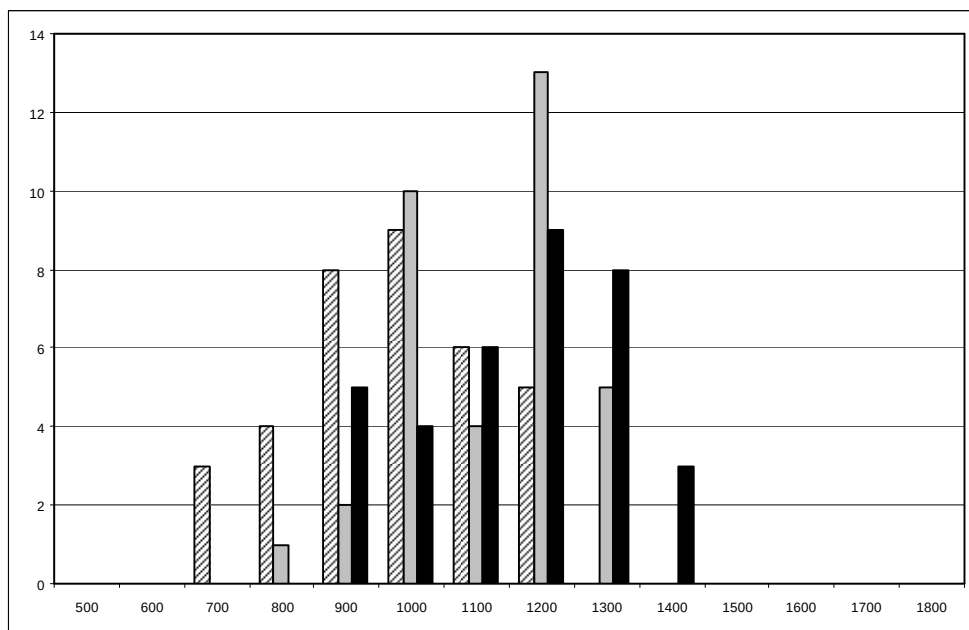


b)



B)





г)

Рис. 2.39. Гистограммы распределения твёрдости недеформированного и образцов претерпевших деформацию: ▨ 1, ▤ 2, ■ 3 раза: а) недеформированный образец, б), в), г) угол скрещения осей соответственно: 0° , 15° , 20°

1. В недеформированном образце наблюдается значительный разброс значений твердости – от 600 до 1400 как в одном поперечном так и в одном продольном ряду. При этом среднее значение твердости достаточно мало. В общем структура неоднородна и твердость невысока – 1037,7.
2. В образце 0x2 также присутствует значительный разброс значений от 800 до 1600, но в одном ряду разброс меньше, чем в недеформированном образце. В осевом направлении значения всех рядов близки друг к другу, но имеют тенденцию уменьшения значения от 1-й точки к 5-й.
3. В образце 0x3 разброс значений меньше, чем в образце 0x2, но и среднее значение твердости уменьшилось до 1029,4. Твердость находится в диапазоне 80-135.
4. В образце 15 разброс значений небольшой, но и среднее значение твердости всего лишь 903. Твердость находится в диапазоне 600-1100. Почему-то меньше даже, чем в недеформированном образце. Зато однородность структуры достаточно высокая.

5. В образце 15x2 разброс значений значительно вырос, твердость находится в диапазоне 600-1400. Очень большой осевой разброс, а поперечный значительно меньше. Средняя твердость – 1110.
6. В образце 15x3 наблюдается как рост средней твердости – 1165, так и уменьшение разброса значений, твердость находится в диапазоне 900-1400.
7. В образце 20 при относительно небольшом разбросе значений 550-1000, очень маленькая средняя твердость, всего лишь 790, значительно меньше, чем в недеформированном образце
8. В образце 20x2 наблюдается очень большой разброс значений 1000-2400. Хотя значительно выделяется только одно значение, остальные находятся в диапазоне 1000-1800. Также в образце очень высокая средняя твердость – 1537.
9. В образце 20x3 разброс значений значительно уменьшается до 900-1400, но и средняя твердость падает до 1205.

В итоге можно сделать следующие выводы:

2. После 1-го прохода средняя твердость как правило падает ниже, чем у недеформированного образца.
3. После 2-го прохода значение твердости значительно вырастает по сравнению с 1-м проходом, но также вырастает и разброс значений. Среднее значение твердости растет с увеличением угла.
4. После 3-го прохода разброс значений заметно уменьшается, но с ним уменьшается и средняя твердость образца. Средняя твердость растет с увеличением угла между валками.
5. Наиболее упорядоченными выглядят результаты для образца с 15 градусами. У него и падение твердости после 1-го прохода меньше и рост твердости между проходами постепенный.

2.2.3. Результаты экспериментальных испытаний на разрыв образцов

После проведения испытаний на разрыв были получены результаты представленные в таблице 2.5:

Таблица 2.5

Образец	σ_s , МПа.	σ_s , МПа	φ , %	φ_{cp} , %
нд 1	290	256,64	20	19,00
нд 2	300		18	
нд 3	280		19	
15х3	320	320,13	6	4,00
15х3	320		3	
15х3	330		3	
20х3	320	300,33	5	4,17
20х3	290		3,5	
20х3	300		4	
н20с	330	297,30	9	11,17
н20с	330		11	
н20с	330		13,5	
ОнД	270	238,94	32	31,67
ОнД	270		32	
ОнД	270		31	
О0	270	270	24	24
О15	270	243,24	25	24,00
О15	270		23	
О15	270		24	
О15х3	270	267,33	10	9,67
О15х3	270		9	
О15х3	270		10	

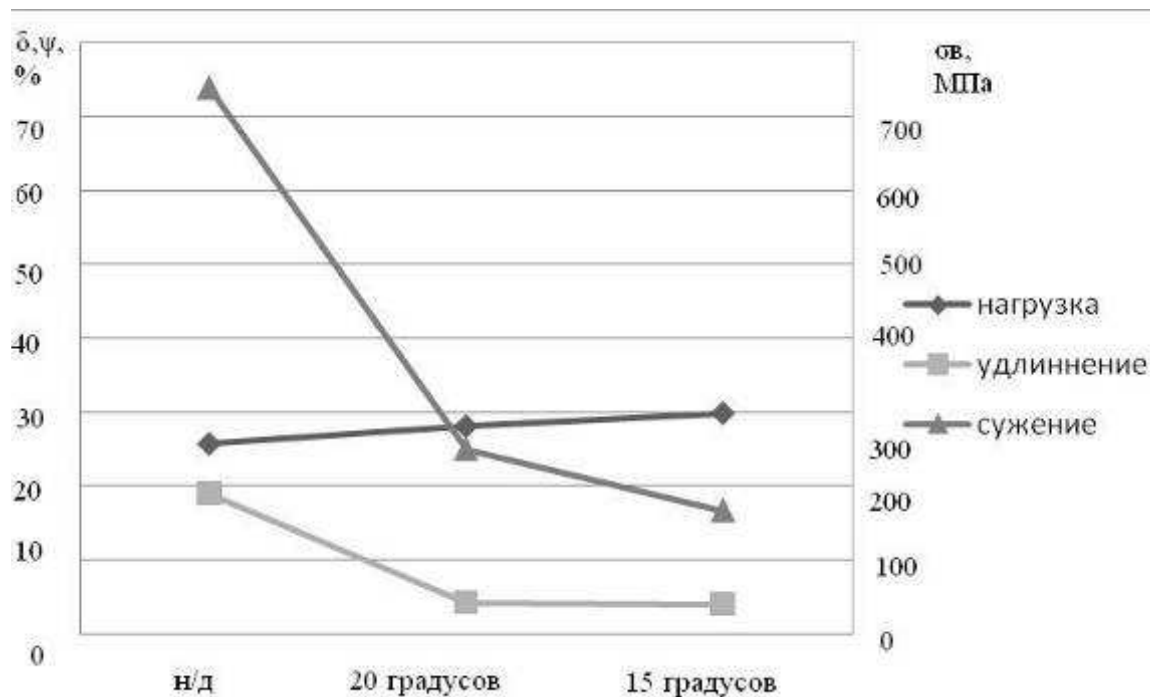


Рис. 2.40. Графики зависимости прочности, относительного удлинения и относительного сужения от режима обработки по старой схеме.

На рис. 2.41 представлен сводный график результатов всех испытаний на разрыв, являющийся обобщением основных результатов испытания образцов по разным схемам деформации, а также при разных условиях начальной подготовки материала перед деформацией.

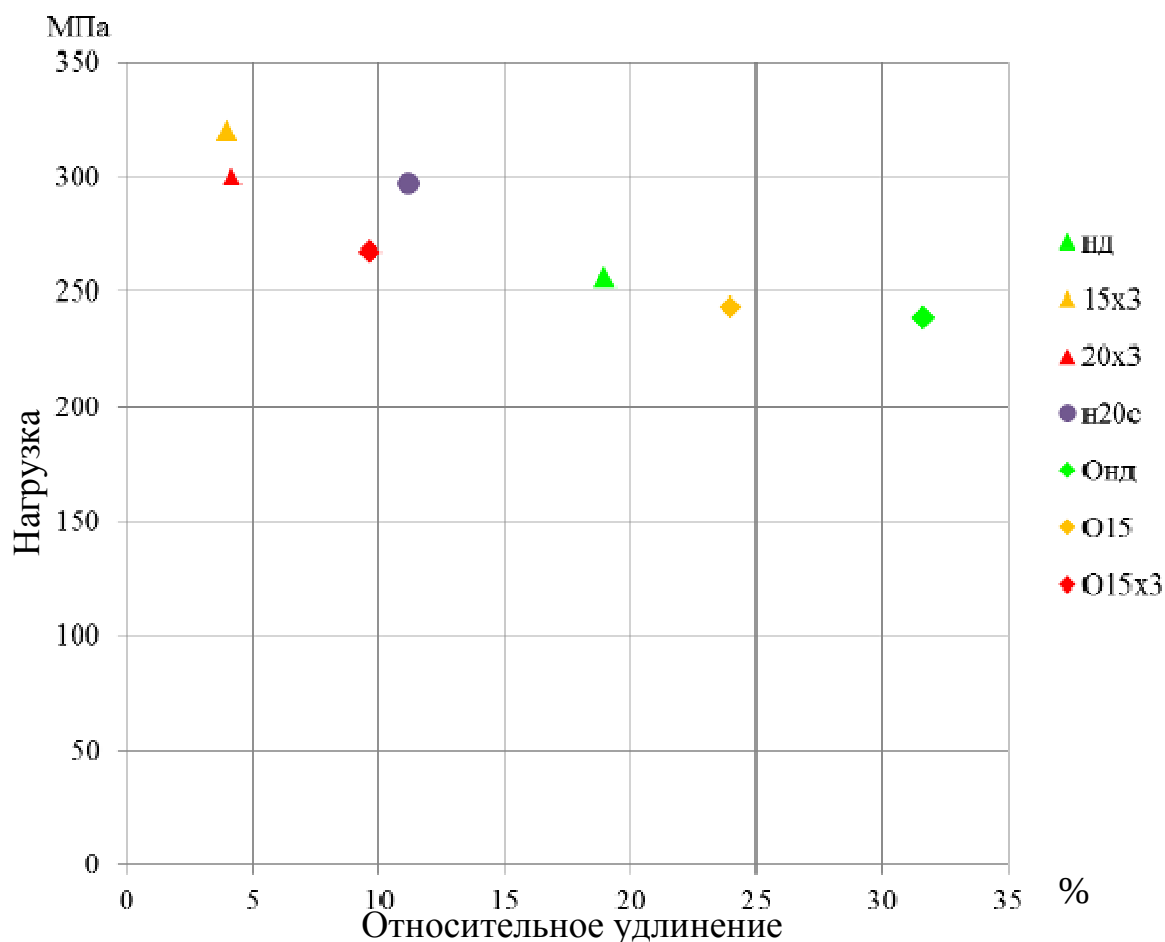


Рис. 2.41. Сводный график испытания образцов (полученных по старой и новой схеме) на разрыв

Из данных результатов видно, что хотя прочность обработанных образцов выше, чем σ_b , пластичность заметно уменьшается по сравнению с исходной.

Полученные результаты показывают, что отожженная медь менее прочная и более пластичная, чем холоднотянутая. Зерна отожженной меди крупнее и менее фрагментированы. В связи с меньшей прочностью и большим запасом пластичности целесообразнее дальнейшие испытания проводить именно с такими образцами.

На основе проведенных исследований можно заключить, что:

1. Создан новый способ деформационного наноструктурирования прокаткой с дополнительной парой роликов для противодействия.

2. Показано, что данным способом повышается прочность и твердость обработанных образцов, фрагментируются зерна, но значительно падает пластичность.

3. Эффективность способа в реализации схемы кручения в условиях сжатия. Как показали исследования, если отсутствует кручение или сжатие, то в образце не происходит требуемых изменений. Таким образом, реализация данной схемы является необходимостью для успешного использования способа деформационного наноструктурирования прокаткой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения отчетного этапа исследований проведены экспериментальные исследования топографии и повышения механических и эксплуатационных свойств за счет совмещения методов ИПД поверхностного слоя деформированных образцов. При моделировании формирования напряженно-деформированного состояния установлено, что при деформационном наноструктурировании методом равноканального углового прессования качественная картина распределения компонентов тензоров напряжений и деформаций не зависит от особенностей реализации метода. Таким образом, учитывая результаты теоретических исследований, полученных на предшествующих этапах выполнения проекта, закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при деформационном наноструктурировании могут быть определены независимо от технической реализации метода обработки. Показано, что для реализации деформационного наноструктурирования необходимым условием является осуществление деформации сдвига в условиях сжатия.

На основе полученных результатов был разработан способ получения ультрамелкозернистых структур прокаткой. Особенностью способа является реализация в процессе обработки схемы деформирования сдвигом в условиях сжатия за счет специальным образом расположенных прокатных валков.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что увеличение механических свойств материала, обработанного с использованием разработанного способа, действительно связано с реализацией схемы деформирования сдвигом в условиях сжатия. Так, прокатка образца без сдвига не приводит к какому-либо значимому изменению размеров структурных фрагментов, тогда как после прокатки со сдвигом все зерна фрагментированы, наблюдается существенное перераспределение гистограммы размеров фрагментов структуры. Отсутствие сжатия приводит к тому, что микротвердость образцов

практически не изменятся, тогда как при наличии сжатия в зоне обработки микротвердость образцов увеличивается на 39%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nazarov A. A., Mulyukov R. R. Nanostructured Materials // Nanoscience, Engineering and Technology Handbook / Eds. Lyshevski S., Brenner D., Iafrate J., Goddard W. Boca Raton: CRC Press. 2002. P. 22-1-22-41.
2. Рааб Г. И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических / Г. И. Рааб - 2009. – 247 с.
3. Кречетов А. А. Технологическое обеспечение структурного состояния металла при деформационном наноструктурировании / А. А. Кречетов, М. В. Пимонов.
4. Валиев Р. З. Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации / Р. З. Валиев // Российские нанотехнологии, том 1. - №1–2, - 2006.
5. Сегал В. М. Процессы пластического структурообразования металлов / Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И. и [др.]. - Минск: Наука и техника, 1994. - 232 с.
6. Сегал В. М. Автореф. дис. докт. техн. наук. - Минск: Физико-техн. ин-т АН БССР, 1974.
7. Сегал В. М., Резников В. И., Дробышевский Ф. Е., Копылов В. И. // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. № 1. С. 115.
8. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
9. Мулюков Р. Р. Объемные наноматериалы: получение, многоуровневая структура, свойства и перспективы применения / Р. Р. Мулюков.
10. Мулюков Р. Р. Предпосылки и научные основы деформационных методов наноструктурирования материалов / Р. Р. Мулюков, А. А. Назаров, Р. М. Имаев, - 2008.